



THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par *l'Institut National Polytechnique Toulouse*

Discipline ou spécialité : *Génie Electrique*

Présentée et soutenue par *Cossi Rockys AKLI*

Le 27 juin 2008

Titre : *Conception systémique d'une locomotive hybride autonome.*

*Application à la locomotive hybride de démonstration
et d'investigations en énergétique LHyDIE
développée par la SNCF*

JURY

M. Alain Bouscayrol Prof. L2EP Lille Rapporteur

M. Nicolas Retière Prof. G2ELab Grenoble Rapporteur

M. Alain Jeunesse SNCF Examineur

M. Gérard Coquery DR INRETS Examineur

M. Marc Debruyne ALSTOM Examineur

M. Xavier Roboam DR CNRS-LAPLACE Directeur de thèse

M. Bruno Sareni MDC LAPLACE Codirecteur

Ecole doctorale : *GEET*

Unité de recherche : *LAPLACE*

Directeur(s) de Thèse : *Xavier Roboam, Bruno Sareni*

Résumé

Dans le cadre du projet PLATHEE (Plate-forme pour Trains Hybrides Economes en Energie et respectueux de l'environnement) la SNCF et le laboratoire LAPLACE s'intéressent à la conception, au dimensionnement et à la gestion d'énergie d'une locomotive hybride autonome baptisée LHYDIE (Locomotive Hybride de Démonstration et d'Investigation en Energétique). La locomotive hybride est constituée d'un groupe diesel couplé à des accumulateurs Ni-Cd et des supercondensateurs.

Une première phase d'étude selon une approche de « conception séquentielle » a permis, à partir d'une architecture pré définie, de synthétiser une stratégie de gestion d'énergie puis de dimensionner les éléments de la locomotive. Dans cette phase d'étude, nous avons mis en évidence la nécessité " d'utiliser le bon modèle au bon moment ", c'est-à-dire de mettre en bonne adéquation modèles et phase de conception. Nous avons ainsi présenté plusieurs niveaux de modélisation, chacun étant associé à une phase de conception particulière. A partir de ces modèles à niveau de granularité variable, nous avons présenté et validé l'architecture, le dimensionnement et la gestion système de la locomotive LHYDIE.

Une seconde phase d'étude a consisté à reprendre le problème selon une démarche de conception simultanée, basée sur un modèle systémique dimensionnel couplé à un outil d'optimisation multicritère. Cet outil permet d'effectuer simultanément différents choix paramétriques inhérents aux dimensions, mais aussi à la stratégie de gestion voire à l'architecture système. Les principaux critères visés sont la consommation et pollution, la durée de vie des composants (de stockage en particulier) et le coût système. Les dimensions et choix en termes de stratégie de gestion issus de cette thèse sont directement exploités sur la locomotive LHYDIE, actuellement en cours de construction.

Mots clés :

- Systémique • Véhicule hybride • Hybridation ferroviaire • Gestion énergétique • Stockage
- Gestion énergétique fréquentielle • Locomotive hybride • Batterie • Supercondensateurs
- Groupe Diesel • Modélisation • Optimisation multicritère • Mission.

Abstract

In the framework of the PLATHEE (PLAt-forme pour Trains Hybrides Economes en Energie et respectueux de l'environnement) project, SNCF and LAPLACE laboratory are together involved with other partners in the design, the energy management and the sizing of a hybrid locomotive so-called LHYDIE (Locomotive Hybride de Démonstration et d'Investigation en Energétique). This hybrid locomotive integrates a diesel generator coupled with Ni-Cd accumulators and supercapacitors.

Based on a "sequential design approach", starting from a pre-defined architecture, the first step deals with the synthesis of the energy management strategy followed by the system sizing. During this first study step, the necessity of "using the right model for the right goal" is put forward : models and design steps are set in accordance. Several granularity levels of modelling are then proposed following the design stage. From these models, architecture, energy management and sizing of the LHYDIE locomotive are defined and validated.

A second step of this study consists in a revision of the design process following a "simultaneous design approach" based on a systemic modelling coupled with a multi criteria optimisation tool. This tool allows simultaneously choosing parameters dealing with sizing, management and even system architecture issues. Main targeted criteria are fuel burn, polluted emissions, life cycle (in particular for storage devices) and system cost. Design choices in terms of sizing and energy management are directly exploited and adapted on the LHYDIE locomotive prototype actually built in SNCF facilities.

Mots clés :

• Systemic • hybrid vehicle • railway traction • energy management • storage • frequency based energy management • hybrid locomotive • accumulators • supercapacitors • diesel generator • modelling • multi criteria optimisation • driving mission.

Avant-propos

Les travaux de recherche présentés dans ce mémoire de thèse ont été effectués au Centre d'Ingénierie du Matériel de la SNCF (CIM) au Mans sous la direction Mr Alain Jeunesse et au laboratoire LAPLACE de Toulouse (site de l'ENSEEIH) sous la direction de Mr Xavier Roboam et de Mr Bruno Sareni.

Je remercie tout particulièrement :

Monsieur Alain Bouscayrol, Professeur à l'Université des Sciences et Technologies de Lille et Monsieur Nicolas Retière, Professeur à l'Institut Polytechnique de Grenoble pour avoir rapporté ce travail et pour les critiques constructives émises.

Monsieur Gérard Coquery, Directeur de recherche à l'Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité, pour avoir accepté de présider ce jury.

Monsieur Marc Debruyne, Ingénieur chez ALSTOM Transport pour l'intérêt porté à ce travail et pour avoir accepté de nous faire l'honneur de sa présence d'industriel averti.

Monsieur Alain Jeunesse, Ingénieur au Centre d'Ingénierie du Matériel de la SNCF pour la confiance qu'il m'a manifestée en me confiant ce travail, pour l'encadrement technique dont il m'a pourvu pendant ces trois années de thèse, pour l'écoute et la compréhension dont il a fait preuve à mon égard et surtout pour sa grande simplicité. Qu'il trouve à travers ce mémoire l'expression de ma gratitude et de mon amitié qui j'espère se poursuivra au-delà de ces années passées à la SNCF.

Monsieur Xavier Roboam, Directeur de recherche CNRS au LAPLACE pour avoir accepté d'encadrer ce travail, pour ces conseils avisés et toujours pertinents, sa rigueur scientifique et ses grandes qualités humaines.

Monsieur Bruno Sareni, Maître de conférences au LAPLACE pour son soutien scientifique riche et plein d'intelligence, pour sa disponibilité et sa grande gentillesse.

Monsieur Maurice Fadel, Directeur Adjoint du LAPLACE pour m'avoir accueilli dans au sein du laboratoire LAPLACE.

Monsieur Mohammed Hosni, Directeur du Centre d'Ingénierie du Matériel de la SNCF pour m'avoir accueilli au sein de son équipe.

Monsieur Thierry Cami, Ingénieur au Centre d'Ingénierie du Matériel de la SNCF pour avoir pris le temps de m'expliquer le fonctionnement des moteurs thermiques.

Tous les partenaires du projet PLATHEE, Marina Thiounn (IR-ASC/SNCF), Eric Le Moal (CIM-ZPC2/SNCF), Benoît Morel (CIM-MTD/SNCF), Yannick EVAIN (SNCF), Richard Lallemand, Juliette Kauv, Bogdan Vulturescu (INRETS), Thierry Huet, Michel Betuel, Farid EL Amss (SOCOFER), André Milewski, Gérard Muller (ERCTEEL), Jocelyn Bejeau, Yves Marc Dumesnil (2HEnergy), Sébastien BOBLET, Michel Plantevin, Boris Giezek (HELION), Alain Maurel, Christophe Noir, Augustin CAILLARD (SOPRANO).

Messieurs Stéphane Astier, Hubert Piquet et Frédéric Richardeau pour les réponses claires qu'ils ont apportées à mes nombreuses questions.

Tout le personnel du LAPLACE, en particulier les secrétaires et comptable qui m'ont facilité la vie au sein du laboratoire.

Je voudrais remercier également :

Mes collègues du bureau E139 pour avoir supporté mes blagues ridicules et mes goûts musicaux d'ailleurs et d'un autre âge.

Mon oncle Déguenon Epiphane et sa femme Emilie pour le soutien financier et le cadre familial dont ils m'ont pourvus depuis mon adolescence.

Ma compagne Edith Montagner, pour son soutien, sa patience et sa compréhension.

Mes beaux parents Marc et Maïté Montagner et Mme Jacqueline Cabanne pour leur disponibilité et leur immense générosité.

Je dédie ce mémoire à ma maman qui a souffert de tant d'années
de séparation et à la mémoire de mon défunt père.

*"Choisissez un travail que vous aimez
et vous n'aurez pas à travailler
un seul jour de votre vie."*

Confucius

Table des matières

Table des figures	xv
Liste des tableaux	xxi
Acronymes	xxiii
Introduction générale	1
1 État de l'art, contexte du projet et cahier des charges de l'étude	5
1.1 Introduction	5
1.2 État de l'art de l'hybridation ferroviaire	6
1.2.1 Pourquoi hybrider un engin ferroviaire ?	6
1.2.2 JR-EAST et son hybridation au Li-ion	7
1.2.3 Locomotives hybrides Green Goats de RailPower	9
1.2.4 Les Citadis de Rotterdam et de Nice	11
1.2.5 Le Mitrac Energy Saver de Bombardier	11
1.2.6 Génération et stockage de l'énergie en ferroviaire	12
1.2.7 Conclusion	16
1.3 Présentation du projet PLATHEE	17
1.3.1 Contexte du projet	17
1.3.2 Objectifs et enjeux	18
1.3.3 Briques technologiques hybridables	20
1.3.4 Le consortium de partenaires	21
1.4 Cahier des charges et démarches scientifiques entreprises	22
1.4.1 Cahier des charges de cette étude	22
1.4.2 Démarches scientifiques entreprises	24
1.5 Conclusion	26
2 Nouvelle approche de la notion de mission : application au ferroviaire	27
2.1 Introduction	27
2.2 La dynamique des trains	27

2.2.1	Efforts nécessaires à la marche du train	28
2.2.2	Sollicitation d'adhérence μ	29
2.2.3	Caractéristique effort-vitesse $F(V)$	29
2.2.4	Conclusion	30
2.3	Caractérisation et classification des missions ferroviaires	31
2.3.1	Potentiel d'hybridation de puissance	34
2.3.2	Potentiel d'hybridation énergétique	35
2.3.3	Valeur informationnelle du triplet (P_{\max} , PHP, PHE)	38
2.4	Application aux missions ferroviaires	40
2.4.1	Missions dominantes ou dimensionnantes	40
2.4.2	Caractérisation des segments de missions	45
2.4.3	Application au démonstrateur LHyDIE	46
2.5	Conclusion et perspectives	47
3	Conception systémique séquentielle d'une locomotive hybride : synthèse	49
3.1	Introduction à la conception systémique séquentielle	50
3.1.1	Une approche plus adaptée à l'hybridation	50
3.1.2	Définitions et conventions	52
3.2	Caractérisation des sources d'énergie et de puissance	53
3.2.1	Groupe Diesel	54
3.2.2	Pile à combustible	55
3.2.3	Batteries, volants d'inertie et supercondensateurs	58
3.2.4	Conclusion	59
3.3	La gestion énergétique fréquentielle	60
3.3.1	Une vision fréquentielle des sources	60
3.3.2	Principe de la gestion fréquentielle	61
3.3.3	Adéquation entre missions et sources	63
3.3.4	Conclusion	65
3.4	Modèles en flux de puissance pour la synthèse énergétique	66
3.4.1	Groupe Diesel	67
3.4.2	Batteries et supercondensateurs	68
3.4.3	Conclusion	70
3.5	Dimensionnement du pack de supercondensateurs	70
3.5.1	Puissance et énergie dimensionnantes	71
3.5.2	Compensation des pertes énergétiques	72
3.5.3	Dimensionnement du pack capacitif	75
3.5.4	Analyse du dimensionnement du pack capacitif	78
3.5.5	Conclusion	79
3.6	Dimensionnement du pack de batteries	79
3.6.1	Introduction au dimensionnement des batteries	80
3.6.2	Limites technologiques des batteries	81
3.6.3	Optimisation de la capacité de stockage du pack de batteries	83
3.6.4	Complexité du problème : étude de cas	86
3.6.5	Algorithme de dimensionnement du pack de batteries	93

3.6.6	Analyse des résultats du dimensionnement	95
3.6.7	Conclusion	97
3.7	Dimensionnement de la plate-forme de démonstration LHyDIE	98
3.8	Conclusion	100
4	Conception systémique séquentielle d'une locomotive hybride : analyse	101
4.1	Modèle d'analyse en flux de puissance	102
4.1.1	Modèle d'analyse en flux de puissance du groupe Diesel	102
4.1.2	Modèles d'analyse en flux de puissance du pack de batteries	104
4.1.3	Modèle d'analyse en flux de puissance du pack capacitif	104
4.1.4	Modèle d'analyse en flux de puissance de la gestion	105
4.1.5	Modèle d'analyse en flux de puissance global	109
4.1.6	Conclusion	111
4.2	Critères de faisabilité	112
4.2.1	Volume du système	113
4.2.2	Dégradation temporelle	115
4.2.3	Coût financier du système	116
4.2.4	Consommation de fuel	118
4.2.5	Durée de vie des batteries	123
4.2.6	Conclusion	128
4.3	Etude de faisabilité et choix du démonstrateur LHyDIE	128
4.3.1	Contrainte de volume et de dégradation temporelle	128
4.3.2	Etude des facteurs d'influence des critères de faisabilité	130
4.3.3	Configurations optimales au sens de Pareto	136
4.3.4	Choix du démonstrateur LHyDIE	139
4.3.5	Comportement de LHyDIE selon la mission réalisée	142
4.3.6	Conclusion	142
4.4	Dimensionnement électrique du démonstrateur LHyDIE	145
4.4.1	Modèles électriques et analyse à l'échelle de la cellule de stockage	145
4.4.2	Tension du bus continu et disposition des éléments	152
4.4.3	Dimensionnement des hacheurs et les éléments de filtrage	155
4.4.4	Conclusion	158
4.5	Conclusion	158
5	Développement du contrôle-commande et de la gestion en temps réel	159
5.1	État des lieux	160
5.1.1	Estimation de l'état de charge des batteries	160
5.1.2	Auto-adaptation de la fréquence de filtrage	160
5.1.3	Compensation des pertes du pack de supercondensateurs	161
5.1.4	L'équilibrage des états de charge entre modules de batteries	162
5.1.5	Gestion du groupe Diesel et des batteries	162
5.1.6	Quelle topologie électrique pour LHyDIE ?	164
5.2	Modèle électrique dynamique moyen	164
5.2.1	Module de batteries et hacheur associé	165

5.2.2	Module de supercondensateurs et hacheur associé	167
5.2.3	Conclusion	169
5.3	Topologie électrique et contrôle-commande de LHyDIE	169
5.3.1	Topologie électrique	169
5.3.2	Commande rapprochée des modules de stockage	171
5.3.3	Régulation de courant	172
5.3.4	Régulation de la tension du bus continu	173
5.3.5	Compensation des pertes dans les supercondensateurs	173
5.3.6	Choix des bandes passantes	175
5.4	Gestion énergétique en temps réel	178
5.4.1	Schéma fonctionnel simplifié de la gestion en temps réel	178
5.4.2	Auto-adaptation de la fréquence de filtrage	178
5.4.3	Gestion du groupe Diesel et de la charge des batteries	182
5.5	Analyses de quelques résultats de simulation	184
5.6	Conclusion	186
6	Conception simultanée par optimisation multicritère d'un train hybride	187
6.1	Introduction à la conception simultanée par optimisation	188
6.1.1	Conception simultanée	188
6.1.2	Processus d'optimisation	188
6.1.3	Organisation du modèle d'optimisation	188
6.2	Paramètres et contraintes du problème d'optimisation	190
6.2.1	Préambule : cartographies dimensionnelles	190
6.2.2	Paramètres du problème d'optimisation	191
6.2.3	Modèle d'optimisation	193
6.2.4	Contraintes en pré-simulation	195
6.2.5	Contraintes en post-simulation	197
6.3	Analyse des résultats de l'optimisation	197
6.3.1	Locomotives référentielles	197
6.3.2	Optimisation pour le segment de desserte	198
6.3.3	Optimisation pour les triages et pour les missions mixtes	201
6.3.4	Conclusion	201
6.4	Conclusion	205
	Conclusion générale	207
A	Base de données des missions ferroviaires	211
A.1	Profils de lignes	211
A.2	Missions de triage et de manœuvre	211
A.3	Mission de transport urbain en omnibus Lille-Valenciennes	215
B	Algorithmes relatifs aux calculs sur l'énergie et la puissance	217
B.1	Intégration saturée	217
B.2	Calcul de l'énergie utile par intégration saturée (CEUPIS)	218

B.3	Recherche dichotomique du dimensionnement optimal (RDDO)	218
C	Bases de données des caractéristiques des sources d'énergie étudiées	221
C.1	Fiche technique du groupe Diesel utilisé sur LHyDIE	221
C.2	Batteries	226
C.2.1	Caractéristiques de la batterie NiCd FNC 1502 HR	226
C.2.2	Cellule Ni-Zn de SCPS	234
C.3	Fiche technique du supercondensateur B49410B2506Q000 (5000 F/2.5 V) . .	234
C.4	Fiche technique du l'IGBT FF450R12ME3 de Infineon	239
D	Comptage des cycles d'un profil d'état de charge d'un dispositif de stockage	249
D.1	Exemple de profil d'état de charge	249
D.2	Balisage du profil d'état de charge	250
D.3	Comptage des cycles	251
E	Calcul des régulateurs de courant et de tension	253
E.1	Régulation de courant	253
E.2	Régulation de la tension du bus continu	256
	Bibliographie	259

Table des figures

1.1	Le New Train japonais et sa gestion énergétique	8
1.2	Architecture des Green Goats (GG20B)	9
1.3	Le CITADIS de Rotterdam hybridé au volant d'inertie	11
1.4	Le Mitrac Energy Saver de Bombardier	12
1.5	Architecture actuelle des trains de la SNCF	18
1.6	Exemple de mission de desserte locale	19
1.7	Analyse de l'utilisation du groupe Diesel de la BB 63000	20
1.8	La BB 63413 (ici à l'EIMM du Mans) et son architecture électrique	23
1.9	Architecture fonctionnelle de la locomotive hybride LHyDIE	24
1.10	Encombres disponibles sur une BB 63000	25
1.11	Démarches scientifiques entreprises	26
2.1	Caractéristiques comparées effort-vitesse de l'ICE3 et du TGV PBKA	30
2.2	Deux exemples de missions théoriques et les PHP associés (1)	35
2.3	Deux exemples de missions théoriques et les PHP associés (2)	36
2.4	Situation du dispositif de stockage dans le plan de Ragone	36
2.5	Deux exemples de missions théoriques différenciées par leur E_u	37
2.6	Mise en évidence des notions de fréquence et de régularité des cycles	39
2.7	Dissociation de la taille de la forme des missions ferroviaires	40
2.8	Comparaison des missions de triage	44
2.9	Comparaison des missions de desserte locale	44
2.10	Caractérisation des segments de mission dans le plan (P_{max} , PHP)	47
2.11	Les deux dessertes locales dimensionnantes	47
3.1	Une nouvelle approche de la conception systémique séquentielle	50
3.2	Architecture de la locomotive hybride LHyDIE	51
3.3	Organigramme de la démarche de synthèse	52
3.4	Contrainte de dégradation temporelle	53
3.5	Une représentation système du groupe électrogène Diesel	54
3.6	Facteurs d'influence de l'efficacité énergétique d'un groupe Diesel.	55

3.7	Modèle thermo-électrique la pile à combustible	56
3.8	Modèle global simplifié du système pile à combustible	56
3.9	Rendement de la pile à combustible PEM de 200 W (ELECTROCHEM) . .	57
3.10	Plan de Ragone des éléments de stockage	59
3.11	Projection du plan de Ragone sur un axe fréquentiel	61
3.12	Vision fréquentielle des sources impliquées dans l'hybridation ferroviaire . .	62
3.13	Croisement entre missions et sources dans un référentiel fréquentiel	63
3.14	Principe de la gestion énergétique fréquentielle	63
3.15	Exemple de répartition de mission par la gestion fréquentielle	64
3.16	Intégration des missions $P_{SC}(t)$ et $P_{BT}(t)$	65
3.17	Compatibilité entre parts de mission et sources	66
3.18	Bilan de puissance de la locomotive hybride	67
3.19	Modèle de synthèse en flux de puissance avec prise en compte des pertes . .	69
3.20	Prise en compte des pertes énergétiques dans la chaîne de stockage	70
3.21	Effet des pertes énergétiques sur le dimensionnement des supercondensateurs	72
3.22	Compensation des pertes du pack capacitif	74
3.23	Compensation des pertes et optimisation du pack capacitif	75
3.24	Prise en compte simultanée des contraintes de puissance et d'énergie.	77
3.25	Dimensionnement du pack capacitif pour chacune des missions	78
3.26	Les deux dessertes locales dimensionnantes	80
3.27	Synthèse de la mission des batteries ($F_{SC} = 3 \text{ mHz}$, $P_{GEN} = 200 \text{ kW}$)	81
3.28	Graphe des contraintes technologiques des batteries	84
3.29	Calcul de l'énergie par intégration simple	85
3.30	Calcul de l'énergie par intégration saturée	85
3.31	Cas 1 : Mission m_8 , $F_{SC} = 3 \text{ mHz}$, $P_{GEN} = 120 \text{ kW}$	87
3.32	Cas 1 : Dimensionnement contraint par l'énergie utile	87
3.33	Cas 2 : Mission m_{11} , $F_{SC} = 3 \text{ mHz}$, $P_{GEN} = 350 \text{ kW}$	88
3.34	Cas 2 : Dimensionnement contraint par la puissance de décharge	89
3.35	Cas 3 : Mission m_{11} , $F_{SC} = 3 \text{ mHz}$, $P_{GEN} = 300 \text{ kW}$	90
3.36	Cas 3 : Dimensionnement contraint par la puissance de charge	90
3.37	Correction de la mission par écrêtage de la puissance de charge à -118 kW .	91
3.38	Dimensionnement issu de l'écrêtage de la puissance de charge	92
3.39	Recherche du dimensionnement optimal	93
3.40	Algorithme du dimensionnement des batteries	94
3.41	Données en entrée et en sortie du processus de dimensionnement des batteries	96
3.42	Missions dimensionnantes : $F_{SC} = 6.1 \text{ mHz}$	97
3.43	Influence des paramètres F_{SC} et P_{GEN} sur N_{BT}	97
3.44	Dimensionnement de la plate-forme de démonstration LHyDIE	98
3.45	Influence énergétique des supercondensateurs sur le reste du système	99
4.1	Modèle d'analyse en flux de puissance du groupe Diesel	103
4.2	Modèle d'analyse en flux de puissance du pack de batteries	105
4.3	Modèle d'analyse en flux de puissance du pack capacitif	106
4.4	Modèle d'analyse en flux de puissance de la gestion énergétique	107

4.5	Bloc de gestion du groupe Diesel	107
4.6	Modèle d'analyse en flux de puissance global	109
4.7	Butée d'énergie pour fréquence de filtrage inadaptée	111
4.8	Analyse du comportement du groupe Diesel et des batteries	112
4.9	Interpolation linéaire du volume du groupe Diesel en fonction de sa puissance nominale	114
4.10	Mise en évidence de la dégradation temporelle	116
4.11	Coût standard (sans prestations) du groupe Diesel en fonction de la puissance	117
4.12	Consommation spécifique nominale de quelques groupes Diesel	119
4.13	Cartographie de consommation d'un groupe Diesel de 215 kW électrique . .	120
4.14	Courbe de consommation à régime constant d'un groupe de 215 kW	121
4.15	Motif de consommation spécifique adimensionnel d'un groupe de 215 kW . .	121
4.16	Validation du motif adimensionnel sur deux groupe Diesels témoins	122
4.17	Graphe expérimental de durée de vie d'une cellule NIMH	123
4.18	Graphe théorique de durée de vie d'une cellule NiCd	124
4.19	Profils de l'état de charge des batteries pour deux configurations données .	125
4.20	Dénombrement des cycles selon leur profondeur de décharge	126
4.21	Evolution de Volume_Σ en fonction de P_{GEN} et de N_{SC}	129
4.22	Evolution de Ind_{DT} en fonction de P_{GEN} et de N_{SC}	130
4.23	Corrélations inter-paramétriques et couple de paramètres libres	131
4.24	Consommation de fuel en fonction du groupe Diesel	132
4.25	Facteurs d'influence du coût d'investissement	134
4.26	Facteurs d'influence du nombre total de cycles-batteries	135
4.27	Influence des supercondensateurs sur la durée de vie des batteries	136
4.28	Représentation des configurations optimales au sens de pareto	137
4.29	Consommation de fuel et coût d'investissement	139
4.30	Consommation de fuel et nombre de cycles-batteries	139
4.31	Coût système et nombre de cycles-batteries	140
4.32	Configuration retenue pour LHyDIE	141
4.33	Situation de la configuration du démonstrateur dans l'espace des critères . .	143
4.34	LHyDIE sur la mission de triage m_1	144
4.35	LHyDIE sur la mission de desserte locale m_{11}	145
4.36	Répartition de la mission dimensionnante m_{11} aux packs de stockage de LHyDIE	147
4.37	Mission de puissance ramenée à la cellule de batterie	148
4.38	Circuit électrique équivalent de type RE d'une cellule de batterie	148
4.39	Format mathématique du modèle électrique d'une cellule de batterie	149
4.40	Evolution du courant et la tension sur une cellule de batteries	150
4.41	Mission de puissance ramenée à la cellule de supercondensateur	150
4.42	Modèle électrique de type RC d'un supercondensateur	151
4.43	Evolution du courant et la tension sur un élément supercondensateur	152
4.44	Disposition des cellules de batteries dans le pack	154
4.45	Configuration électrique du démonstrateur LHyDIE	156

4.46	Structure du convertisseur de stockage à plusieurs bras entrelacés	156
4.47	Courants dans un hacheur à trois bras entrelacés	157
5.1	Evolution de la fréquence de filtrage en fonction de la mission	161
5.2	Déséquilibre des états de charge entre modules de batteries	162
5.3	Profils de la limitation du courant de charge par module de batteries	163
5.4	Circuit électrique équivalent d'un module de batteries et son hacheur	166
5.5	Modèle électrique dynamique moyen d'un module de batteries et son hacheur	166
5.6	Circuit électrique équivalent d'un module de supercondensateurs et son ha- cheur	168
5.7	Modèle électrique dynamique moyen d'un module de batteries et son hacheur	169
5.8	Topologie électrique et fonction des modules du démonstrateur LHyDIE . .	170
5.9	Commande rapprochée d'un module de batteries	171
5.10	Commande rapprochée d'un module de supercondensateurs	172
5.11	Modèle du hacheur et régulateur de courant associé (1)	172
5.12	Modèle du bus et le régulateur de tension associé	173
5.13	Compensation des pertes dans les supercondensateurs	174
5.14	Simplification de la boucle de compensation	175
5.15	Réponses indicielles de RegI_{SC} et de RegI_{BT}	176
5.16	Réponse indicielle de RegV_{BUS}	177
5.17	Réponse indicielle de RegV_{SC}	177
5.18	Cartographie des bandes passantes, des temps de réponse et des dynamiques	177
5.19	Schéma fonctionnel simplifié de la gestion énergétique en temps réel	179
5.20	Plage de variation de F_{SC} en fonction du nombre de modules de supercon- densateurs disponibles	180
5.21	Observation de l'utilisation des supercondensateurs	181
5.22	Logique d'auto-adaptation de la fréquence de filtrage F_{SC}	182
5.23	Sévérité d'une mission de desserte	183
5.24	Sévérité d'une mission de triage	183
5.25	Processus d'auto-adaptation de F_{SC} sur une journée de desserte locale . . .	185
5.26	Processus d'auto-adaptation de F_{SC} sur une journée de triage	185
6.1	Boucle d'optimisation	189
6.2	Organisation du modèle d'optimisation de la locomotive hybride	189
6.3	Cartographies dimensionnelles pour la mission m_2	190
6.4	Position de $(N_{\text{SCi}}, N_{\text{BTi}}, P_{\text{GENi}})$ par rapport aux minima de puissance et d'énergie	191
6.5	Modèle d'optimisation	194
6.6	Contraintes liées aux minima d'énergie et de puissance (cas d'un nombre important de supercapacités)	196
6.7	Front de Pareto pour le segment de dessertes locales	199
6.8	Etude paramétrique du front de Pareto pour le segment de dessertes locales	200
6.9	Front de Pareto pour le segment de triages	202
6.10	Etude paramétrique du front de Pareto pour le segment de triages	203

6.11	Front de Pareto pour le segment mixte	204
A.1	Deux exemples de profils de ligne et de vitesse maximale	211
A.2	Missions de triage, de manoeuvre et de desserte locale	212
A.3	Missions de triage, de manoeuvre et de desserte locale	213
A.4	Missions de triage, de manoeuvre et de desserte locale	214
A.5	Mission de transport urbain en omnibus Lille-Valenciennes	215
B.1	Recherche du dimensionnement optimal	219
B.2	Algorithme du processus RDDO	220
D.1	Exemple de profil d'état de charge	249
D.2	Balisage du profil d'état de charge	251
D.3	Filtrage des cycles de moins de 20% de profondeur	252
D.4	Filtrage des cycles de moins de 50% de profondeur	252
E.1	Modèle du hacheur et le régulateur de courant associé (1)	253
E.2	Modèle du hacheur et le régulateur de courant associé (2)	254
E.3	Modèle simplifié du hacheur et le régulateur de courant associé (3)	255
E.4	Modèle du bus et le régulateur de tension associé	256

Liste des tableaux

1.1	Les locomotives hybrides de RailPower	10
1.2	Principales caractéristiques des technologies de batteries	14
1.3	Caractéristiques du module NiZn de 30 Ah développé par SCPS	16
1.4	Comparaison de trois mode de transport de personnes	17
2.1	Quelques exemples de formules de résistance à l'avancement (RAV)	29
2.2	Base de données des missions enregistrées dans le cadre du projet PLATHEE	42
2.3	Caractérisation des missions ferroviaires	43
2.4	Caractérisation des segments de missions	46
3.1	Extraits des caractéristiques du supercondensateur EPCOS 5000 F/2.5 V . .	76
3.2	Extraits des caractéristiques de cellule FNC 1502 HR de Hoppecke	82
4.1	Pondération des cycles selon leur profondeur de décharge	125
4.2	Pondération des cycles selon leur profondeur de décharge	127
4.3	Jeu de configurations proposées pour le démonstrateur LHyDIE	140
6.1	Caractéristiques des locomotives de référence	198
6.2	Caractéristiques des solutions analysées pour le segment de dessertes locales	200
C.1	Caractéristiques du module NiZn de 30 Ah développé par SCPS	234
D.1	Tableau des cycles bruts	250

Acronymes

ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
AFSSET	Agence Française de Sécurité Sanitaire de l'Environnement et du Travail
ANR	Agence Nationale de la Recherche
CCEE	Commission des Comptes et de l'Économie de l'Environnement
GES	Gaz à Effet de Serre
LHyDIE	Locomotive Hybride de Démonstration et d'Investigations en Énergétique
OMS	Organisation Mondiale de la Santé
PLATHEE	PLAte-forme pour Trains Hybrides Économes en Énergie et Respectueux de l'Environnement
PREDIT	Programme national de Recherche d'Expérimentation et D'Innovation dans les Transports terrestres
RTE	Réseau de transport de l'électricité
RFF	Réseau ferré de France
SNCF	Société Nationale des Chemins de fer Française

Introduction générale

Le secteur des transports est celui dont la contribution à la croissance des émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) est la plus importante. D'après son rapport « *Mobilité, transport et environnement* » de décembre 2006 [1], la Commission des Comptes et de l'Économie de l'Environnement (CCEE), rappelle qu'aujourd'hui, le transport est responsable de 27% des émissions totales de GES. Selon les projections du ministère des transports, les émissions de GES augmenteraient de plus de 17% d'ici 20 ans. La qualité de l'air des zones urbaines reste préoccupante et nuisible à la santé. Selon l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), la pollution atmosphérique (particules en suspension) représentait, dans l'Union européenne en 2000, environ 8.6 mois de vie perdue par personne. D'après l'Agence Française de Sécurité Sanitaire de l'Environnement et du Travail (AFSSET), en 2002, 3.3% des décès d'adultes de plus de 30 ans en France étaient imputables aux particules fines. Devant ce constat très alarmant, la recherche de solutions drastiques au problème de pollution est aujourd'hui une priorité incontestable.

Les pays signataires du protocole de Kyoto se sont engagés à réduire d'ici 2010 leurs émissions de dioxyde de carbone (CO_2) de 8% par rapport à leur niveau de 1990. En complément aux normes européennes et internationales en matière de protection de l'environnement, plusieurs autres outils sont utilisés, en particulier en Europe et au Canada, pour inciter les industriels à réduire leur "emprunt carbone". Le premier de ces outils est la taxe carbone⁽¹⁾ [2]. Elle est pratiquée notamment, en Suède, au Danemark, en Allemagne et au Royaume-Uni. Son application en France est à l'étude. Il y a aussi la bourse du carbone, qui est un marché de négociation et d'échange de crédit d'émission de gaz à effet de serre. La bourse du carbone est pratiquée essentiellement au Canada et dans quelques états au nord des USA (le Connecticut, le Delaware, le Maine, le New Hampshire, le New Jersey, l'état de New York, et le Vermont). En Europe, le marché de permis européen EU-ETS⁽²⁾ est un système d'échange de quotas d'émission de gaz à effet de serre, mis en place par la directive 2003/87/CE.

⁽¹⁾La taxe sur les émissions de carbone ou taxe carbone, également appelée fiscalité carbone, est une proposition de taxe sur tous les combustibles fossiles (pétrole, charbon, gaz naturel, etc.).

⁽²⁾European Union Emissions Trading Scheme.

Tous ces outils visent à responsabiliser les industriels et à faire de la protection de l'environnement un enjeu économique, plus incitatif pour les acteurs industriels : c'est le principe du "pollueur payeur".

Par ailleurs, toutes les activités dépendant de l'industrie pétrolière, en particulier les transports, doivent anticiper l'ère de l'"après pétrole". En effet, même si les données relatives aux réserves de pétrole donnent lieu à de vives controverses entre écoles de pensée, la fin du pétrole, du moins sa raréfaction, est une réalité tangible. On estime de 1 à 1,2 milliard de milliards de barils les réserves de pétrole dites prouvées, soit 150 milliards de tonnes environ, ou encore une production d'une quarantaine d'années au rythme actuel. Les records répétés de prix et la tension du marché du pétrole sont les signes avant coureurs d'une ère nouvelle, sans pétrole.

Aujourd'hui, la préparation du transport du futur, écologiquement propre et à "zéro pétrole", est une question stratégique et une étape incontournable. Plusieurs industries et laboratoires travaillent au perfectionnement des solutions alternatives de génération de l'énergie telles que la pile à combustible, les biocarburants et des systèmes de stockage tels que les batteries, les volants d'inertie et les supercondensateurs. Cependant, ces nouvelles technologies n'ont pas encore atteint la maturité nécessaire pour leur démocratisation : la pile à combustible est "hors de prix" et les problèmes de sécurité inhérents au stockage de l'hydrogène ne sont pas encore résolus. Pour ce qui concerne les accumulateurs électrochimiques, leurs performances et leur durée de vie doivent encore évoluer pour répondre aux exigences d'autonomie et de moindre coût. S'il semblent assez bien maîtrisés dans les applications stationnaires, les volants d'inertie posent encore beaucoup de problèmes de sécurité pour le domaine des transports. Bref, la conception de véhicules électriques financièrement abordables et à grande autonomie attendra encore quelques années...

En attendant la maturité de ces nouvelles technologies de génération et de stockage de l'énergie électrique, les véhicules hybrides constituent une alternative intéressante qui garantit l'autonomie des véhicules thermiques tout en pourvoyant une certaine sobriété en carbone. Aujourd'hui certains industriels et gouvernements consentent des efforts au développement des véhicules hybrides. L'automobile est le secteur le plus concerné pour sa contribution, en croissance vertigineuse, à la pollution globale. Mais le ferroviaire est aussi concerné : pour ses besoins en engins autonomes de secours, pour couvrir son réseau non électrifiable (terminaisons portuaires, gares de triages) et son réseau non électrifié. Aux États-Unis, la quasi totalité du réseau ferré est non électrifié et le pack d'engins ferroviaires est essentiellement thermique. Même en France, malgré une large électrification des lignes grandes vitesses, une bonne partie du réseau est non électrifiée. De plus, pour faciliter la mobilité sur tout le réseau, la SNCF continue à acheter des locomotives Diesel. Dans ces conditions, les enjeux économiques liés à la taxation des émissions de carbone et au prix en constante augmentation du pétrole, couplé au besoin stratégique d'indépendance par rapport au pétrole sont autant de raisons qui justifient l'hybridation ferroviaire.

Des expériences réussies ont déjà eu lieu notamment au Canada et au Japon.

Dans une démarche globale d'asservissement du bilan énergétique et climatique de son pack d'engins ferroviaires, et pour acquérir le savoir-faire en matière de spécification de futures locomotives hybrides, la SNCF s'intéresse de près à la problématique de l'hybridation ferroviaire. C'est dans cet élan que s'inscrit le projet PLATHEE (PLAte-forme pour Trains Hybrides Économes en Énergie et Respectueux de l'Environnement). A travers ce projet, la SNCF répond aux objectifs de l'appel à propositions lancé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) et l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) dans le cadre du Programme national de Recherche d'Expérimentation et D'Innovation dans les Transports terrestres (PREDIT). Le projet PLATHEE est cofinancé par l'ADEME et la SNCF et regroupe plusieurs partenaires, notamment les laboratoires LAPLACE et INRETS, les industriels Socofer, 2HEnergy, Soprano, Hélion, ERCTEEL et ALSTOM transport. A travers la construction d'une plate-forme expérimentale nommée "Locomotive Hybride de Démonstration et d'Investigations en Energétique (LHyDIE)" à l'échelle réelle, le projet PLATHEE vise à explorer aussi bien l'ensemble des technologies de génération, de stockage, et de conversion de l'énergie électrique, que l'ensemble des problématiques (gestion énergétique, efficacité énergétique, conception systémique, notion de mission, éco-conception, ...) impliquées dans l'hybridation ferroviaire. Cette plate-forme embarquera, en fonction des versions successives, un groupe Diesel, un pack de batteries, un pack de supercondensateurs et une pile à combustible. La présente étude constitue le volet scientifique de ce projet : elle aborde, de façon générale, la conception systémique d'une locomotive hybride. Nous avons entrepris notamment deux démarches concurrentes de conception systémique :

- Une première phase d'étude selon une approche de « conception séquentielle » a consisté à synthétiser le dimensionnement et la gestion énergétiques d'une locomotive hybride. Nous avons proposé et développé une gestion énergétique originale basée sur des considérations fréquentielles et entièrement compatible avec la nature des dispositifs de stockage embarqués. Les dimensions et choix en termes de stratégie de gestion issus de cette thèse sont directement exploités sur la locomotive LHYDIE, actuellement en cours de construction. Dans cette phase d'étude, nous avons mis en évidence la nécessité " d'utiliser le bon modèle au bon moment ", c'est-à-dire de mettre en bonne adéquation modèles et phase de conception. Nous avons ainsi présenté plusieurs niveaux de modélisation, chacun étant associé à une phase de conception particulière. A partir de ces modèles à niveau de granularité variable, nous avons présenté et validé l'architecture, le dimensionnement et la gestion système de la locomotive LHYDIE.
- Une seconde phase d'étude a consisté à reprendre le problème selon une démarche dite de « conception simultanée », basée sur un modèle systémique dimensionnel couplé à un outil d'optimisation multicritère. Cet outil permet d'effectuer « simultanément » différents choix paramétriques inhérents aux dimensions, mais aussi à la stratégie de gestion voire à l'architecture système. Les principaux critères visés sont la consommation et la pollution, la durée de vie des composants (de stockage en particulier) et le coût système. L'objectif de cette seconde démarche « d'éco-conception » est de déga-

ger, suivant la nature des missions et les projections du coût du gasoil, les tendances fortes sur les trains hybrides du futur.

Ce manuscrit est organisé en 6 chapitres. Le premier présente respectivement l'état de l'art de l'hybridation ferroviaire, le contexte et le cahier des charges de cette étude. Après une première section introductive, nous présentons l'état de l'art de l'hybridation ferroviaire à travers quelques exemples de trains hybrides et aussi à travers une analyse des motivations de la démarche d'hybridation dans le domaine ferroviaire. Ensuite, nous présentons le cadre de cette étude, notamment le projet PLATHEE et le consortium de partenaires qui y participent. Enfin, nous présentons le cahier des charges spécifique de cette étude et les démarches scientifiques entreprises.

Le chapitre 2 est une contribution à l'analyse, la caractérisation et la classification des missions, appliquée au contexte de l'hybridation ferroviaire. Nous proposons dans ce chapitre, une nouvelle approche de la notion de mission, plus adaptée à la problématique de l'hybridation. Nous démontrons notamment qu'il est possible, à travers un jeu d'indicateurs bien formulés, de caractériser et de classer les missions ferroviaires.

Les chapitres 3, 4 et 5 présentent la démarche de la conception systémique séquentielle appliquée à la conception du démonstrateur LHyDIE. Le chapitre 3 présente une phase « synthèse » où nous synthétisons le dimensionnement et la gestion énergétiques de LHyDIE. Le chapitre 4 présente une phase « analyse » où nous analysons, à travers une étude de faisabilité, les solutions issues de la phase de synthèse. A l'issue de cette analyse, nous affinons la conception de LHyDIE par une étape de dimensionnement électrique (disposition des éléments de stockage, tension de bus, convertisseurs, éléments passifs).

Le chapitre 5 traite de la mise en œuvre de la gestion énergétique en temps réel. Dans ce chapitre, nous abordons la synthèse du contrôle-commande (calcul des régulations de courant et de tension, choix des temps d'échantillonnage, algorithme de gestion).

Le chapitre 6 présente la démarche de conception simultanée. Nous posons dans ce chapitre, sous la forme d'un problème d'optimisation, l'ensemble des phases de conception systémique de la locomotive hybride. A l'aide des différents modèles développés dans la première phase de l'étude, nous avons élaboré un modèle systémique dimensionnel global, adapté à la problématique de l'optimisation multicritère. Les critères minimisés sont le coût financier et le « coût climatique ».

Chapitre 1

État de l’art, contexte du projet et cahier des charges de l’étude

1.1 Introduction

Le développement des véhicules électriques s’est fait en trois phases alternées par des périodes de désintérêt ou de stagnation [3]. La démonstration de *Gaston Planté* à l’Académie Française des Sciences le 26 mars 1860 [3, 4] d’une batterie au plomb plus légère et plus efficace, a dopé la recherche dans le domaine des batteries. Quelques années plus tard, furent mises au point les batteries alcalines rechargeables Nickel-Cadmium et Nickel-Fer [5, 6]. Ces batteries furent produites à l’échelle industrielle à la fin du 19^{ème} siècle [3]. Les retombées furent immédiates dans le domaine de la traction électrique. Vers 1912, des centaines de milliers de véhicules électriques (voitures, camionnettes, trams et bus) circulaient dans les grandes villes en Europe, aux USA et en Australie. Mais cette révolution de la traction électrique fut courte.

En effet, l’invention des moteurs à combustion interne à démarrage automatique puis la construction des premières lignes d’assemblage de véhicules Diesel par Henry Ford en 1913 ont ralenti la progression des véhicules électriques [3]. Les véhicules Diesel pourvoyant plus d’autonomie, de mobilité et de vitesse tout en étant moins chers, les améliorations sur la durée de vie et les performances des batteries n’ont pas pu renverser la tendance.

Il fallut attendre la crise pétrolière de 1973 et l’émergence de plusieurs technologies de stockage de l’énergie pour voir réapparaître l’intérêt pour les véhicules électriques. Plusieurs équipes de recherche en France, aux États-Unis et Royaume-Uni s’y sont intéressées [3]. Mais la traction électrique ne connut sa véritable période de gloire qu’à partir du protocole de Kyoto en 1992 et de façon plus accentuée ces dernières années avec la sensibilisation générale des gouvernements et des populations du monde entier aux problèmes environnementaux.

Malgré les efforts déployés par plusieurs industriels et laboratoires de recherches pour le développement de nouvelles technologies de stockage et de génération de l'énergie plus saines vis-à-vis de l'environnement et économiquement viables, la réalisation industrielle d'un véhicule électrique de grande autonomie et de hautes performances, n'est pas d'actualité. En particulier, dans le domaine ferroviaire où les puissances sont largement supérieures à celles pratiquées dans l'automobile, il est économiquement et technologiquement impossible de concevoir des trains rapides ou des trains fret mus par la seule puissance d'une batterie ou d'un volant d'inertie et/ou d'une pile à combustible. En attendant la maturité et l'accessibilité économique de ces nouvelles technologies de génération et de stockage de l'énergie, les véhicules hybrides constituent une alternative intéressante.

Ce chapitre est divisé en trois parties. La section §1.2 présente l'état de l'art de l'hybridation ferroviaire. Ensuite, la section §1.3 présente le projet PLATHEE, dans le cadre duquel est réalisée cette étude. Enfin, la section §1.4 présente le cahier des charges de cette étude et les démarches scientifiques que nous avons entreprises.

1.2 État de l'art de l'hybridation ferroviaire

1.2.1 Pourquoi hybrider un engin ferroviaire ?

Cette question renvoie à la motivation de la démarche d'hybridation ferroviaire. En effet, le ferroviaire est reconnu comme un transport durable "sobre en carbone". Selon l'ADEME et la SNCF [7, 8], en France, le transport ferroviaire voyageur émet en moyenne $5.38 \text{ gCO}_2/(\text{voyageur.km})$ contre $148 \text{ gCO}_2/(\text{voyageur.km})$ pour l'aérien. Cette performance est spécifique à la France où la plupart des trains voyageurs sont électriques. En tenant compte du taux de remplissage des trains⁽¹⁾, le pack de trains voyageurs à la SNCF est constitué de 85% de TGV (électriques), 10% de TRN dont 12% de Diesel et 5% TER dont 36% de Diesel. Le tableau se noircit légèrement lorsqu'on élargit le calcul à d'autres pays européens comme l'Allemagne, la Belgique, l'Espagne, l'Italie, le Luxembourg, les Pays-bas et le Royaume-Uni. L'indicateur climatique du ferroviaire s'élève alors à $56 \text{ gCO}_2/(\text{voyageur.km})$. Ce chiffre est en encore plus mauvais aux USA où, en dehors des lignes de métro ou de tram, le réseau ferré est presque entièrement non électrifié. Mais le transport ferroviaire reste globalement, en comparaison à l'automobile et l'aérien, le moyen de transport qui a le moins d'impacts fâcheux sur l'environnement.

Néanmoins, sur certains segments de missions tels que les triages, les manœuvres et les dessertes locales, le ferroviaire est plutôt un "mauvais élève". En effet, sur ces missions généralement assurées par des locomotives Diesel, les moteurs thermiques tournent plus de 60% du temps au ralenti [9, 10, 11]. Ce mode de fonctionnement est synonyme d'un excès de consommation de fuel, d'émission de polluants et de nuisances sonores [12, 13, 14, 15]. L'hybridation de ces engins favorise une économie de fuel et donc une réduction

⁽¹⁾Attention, ces chiffres sont calculés par rapport au taux de remplissage des trains et non par rapport au nombre d'engins de chaque catégorie.

des émissions nocives et des nuisances sonores⁽¹⁾ [9, 10]. En outre, il est stratégiquement indispensable pour les acteurs du domaine des transports (automobile, ferroviaire et aérien) de préparer leur entrée dans l'ère de l'« après pétrole ». Pour une locomotive électrique, l'hybridation par du stockage en local permet le lissage de la consommation sur la caténaire et une meilleure qualité du réseau de distribution de l'énergie.

Une nouvelle forme d'hybridation ferroviaire est développée sur certains tramways : il s'agit d'une hybridation pour raison d'autonomie au passage de plages ou d'ouvrages historiques que les autorités locales ne veulent pas dénaturer par la pose de caténaires apparentes (visibles). C'est notamment le cas du Citadis de Rotterdam et de celui de Nice, construits par l'industriel ALSTOM.

Ainsi, la première motivation de l'hybridation ferroviaire est la réduction de la consommation de gasoil et des émissions de CO₂, intersection entre l'économie et environnement. C'est pour cela que le cas d'hybridation ferroviaire le plus répandu est l'hybridation des locomotives Diesel⁽²⁾. Par ailleurs, malgré la percée des nouvelles technologies de stockage telles que les supercondensateurs et les volants d'inertie, les accumulateurs électrochimiques restent le système de stockage le plus intéressant pour des applications nécessitant une capacité de stockage élevée. Leur utilisation assez répandue les rend économiquement plus attrayantes que les autres solutions. De fait, l'architecture d'engins ferroviaires hybrides la plus répandue est celle qui associe un ou des moteurs thermiques et une batterie d'accumulateurs électrochimiques.

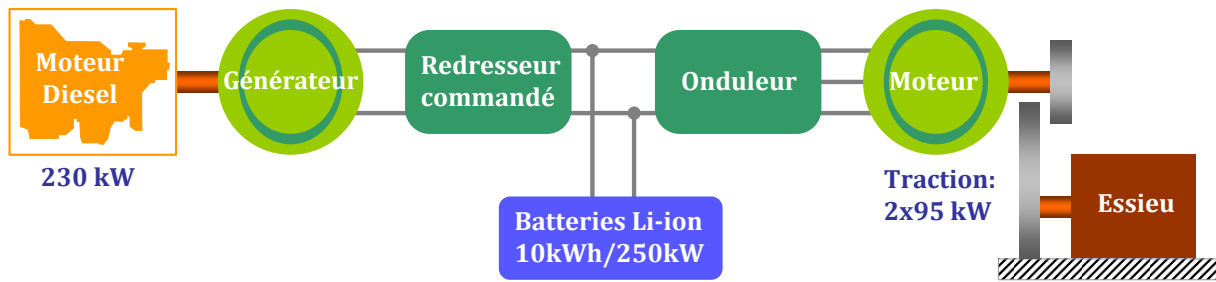
1.2.2 JR-EAST et son hybridation au Li-ion

La compagnie japonaise JR-EAST est la première compagnie à avoir mis sur rails un engin ferroviaire hybride [16, 17]. Le New Energy Train (NE@Train) est un train de banlieue. L'architecture est sobre : un groupe Diesel de 230 kW électrique est associé à un pack de batteries lithium-ion de 10 kWh capable de fournir 250 kW de puissance crête. JR-EAST explique le choix de la technologie lithium-ion (Li-ion) par ses performances aussi bien en densité de puissance qu'en densité d'énergie. De plus, JR-EAST compte sur une baisse de prix consécutive à l'augmentation prévisible de l'utilisation de cette technologie dans l'automobile. La figure 1.1a montre l'architecture du NE@Train. Le groupe Diesel fournit sa puissance sur un bus DC à travers un redresseur commandé. Le pack de batteries est directement connecté sur le bus DC. Le contrôle de l'état de charge des batteries est donc fait indirectement par le contrôle du flux de puissance venant du groupe Diesel.

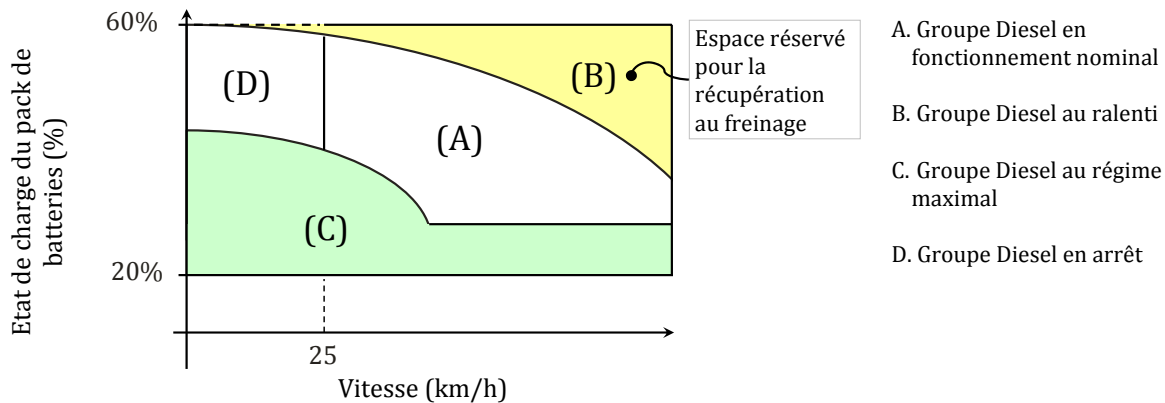
L'originalité du NE@Train réside dans sa gestion énergétique. En effet la gestion énergétique du NE@Train intègre la structure mécanique massive de la locomotive pour son effet inertiel. Ainsi, en fonction de la vitesse, le système de gestion estime l'énergie potentiellement récupérable jusqu'au prochain arrêt du train. La batterie est alors gérée de

⁽¹⁾La SNCF reçoit fréquemment des plaintes de riverains indisposés par les vacarmes nocturnes de locomotives Diesel dans les gares de triage.

⁽²⁾Des cas d'hybridation d'engins électriques existent. Le Mitrac Energy Saver de Bombardier en est un exemple. Dans ce cas, le but recherché est le lissage du prélèvement sur la caténaire ou la possibilité de rouler en absence de caténaire. Mais l'intérêt climatique direct de tels engins est mince.



(a) L'architecture électrique du NE@Train



(b) La gestion énergétique du NE@Train

Fig. 1.1: Le New Train japonais et sa gestion énergétique

façon à réserver de la place à cette énergie potentielle de récupération. Cette gestion garantit la récupération totale aux pertes près de l'énergie stockée dans la masse roulante. En phase d'accélération, il y a un transfert d'énergie des batteries vers la masse roulante. Cette énergie est ensuite restituée aux batteries lors des phases de décélération ou d'arrêt. Le fonctionnement du groupe Diesel est calé sur l'énergie totale stockée dans les batteries et la masse roulante. La figure 1.1b montre quatre zones de fonctionnement suivant l'état de charge des batteries et la vitesse du train. Globalement l'énergie totale stockée est maintenue entre 20% et 60% de la capacité de stockage des batteries. Lorsque cette énergie évolue entre 40% et 60%, le groupe diesel est à son régime nominal (zone A) ou en arrêt si la vitesse est faible (< 25 km/h, zone D). Au dessus de 60%, le groupe est mis au ralenti (zone B). En dessous de 40% d'énergie totale stockée, le groupe tourne au régime maximal (zone C).

JR-EAST annonce une réduction de 20% de la consommation de gasoil et une réduction impressionnante des émissions polluantes (NO_x, HC, CO et les particules nocives) de 50% en comparaison avec une locomotive Diesel. De plus, l'arrêt du groupe à faible vitesse réduit les nuisances sonores dans les stations.

Malgré ses excellentes performances économiques et environnementales, le NE@Train n'est qu'un exemple, édifiant certes, de gestion intelligente de l'énergie. Mais ce train ne constitue par un véritable modèle d'hybridation ferroviaire, car la puissance du Diesel de

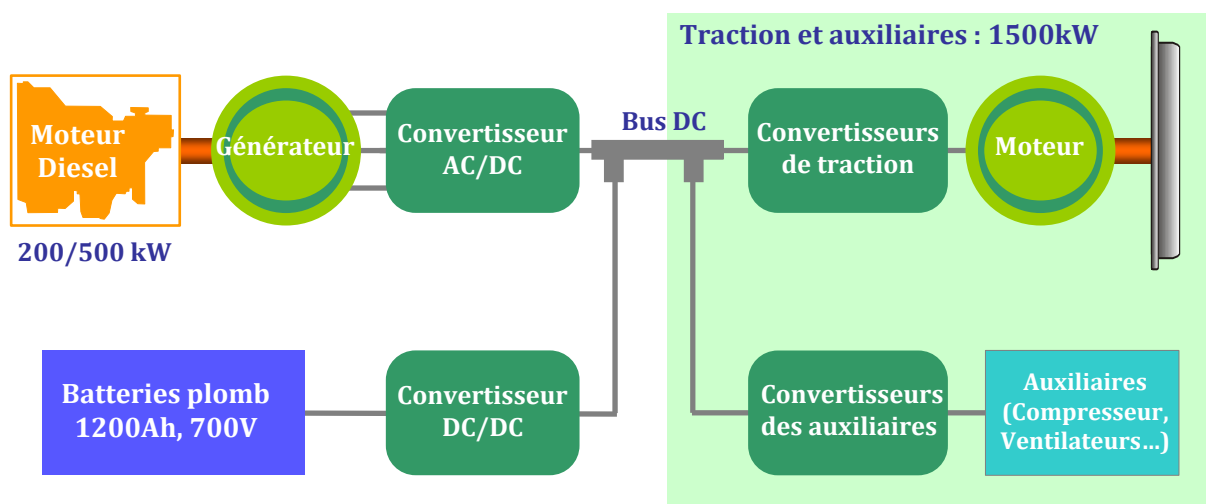


Fig. 1.2: Architecture des Green Goats (GG20B)

230 kW embarquée reste trop élevée pour un besoin en traction de 2×95 kW. La véritable révolution en matière d'hybridation ferroviaire est venue du Canada avec RailPower.

1.2.3 Locomotives hybrides Green Goats de RailPower

La société canadienne RailPower est le premier constructeur ferroviaire à produire de façon industrielle des locomotives hybrides Diesel-batteries [9, 10]. Fondée en 2001 par Frank Donnelly, la société RailPower s'est spécialisée dans le recyclage de vieilles locomotives Diesel qu'elle remotorise en remplaçant le groupe Diesel initial par un plus petit groupe Diesel auquel est associé un pack de batteries. Frank Donnelly est parti du constat que les moteurs Diesel qui équipent les locomotives Diesel utilisées dans les gares de triage et sur les petites lignes nord-américaines, tournent en permanence et la plupart du temps au ralenti pour assurer l'alimentation des auxiliaires, même quand les locomotives sont en arrêt. Ce mode d'utilisation des moteurs Diesel entraîne une consommation excessive, un "encrassement" des moteurs et une pollution injustifiable dans le contexte climatique actuel. Railpower commercialise deux séries de locomotives hybrides :

1. La série Green Goat est une série de locomotives hybrides de triage. Elles sont équipées d'un petit groupe Diesel (200 kW pour le prototype GG20B contre 1500 kW pour une locomotive Diesel équivalente) complété par un grand pack de batteries plomb de dernière technologie à mats de fibres de verre absorbant (1200 Ah sous 600 VDC) pour le prototype GG20B (tableau 1.1).
2. La série RP déclinée en deux versions est une série de locomotives hybrides de manœuvre. Elles embarquent deux (pour la version RP20BH) ou trois (pour la version RP20BD) groupes Diesel (tableau 1.1).

La figure 1.2 montre l'architecture de la Green Goat GG20B. Un impressionnant pack de batteries (1200 Ah/700 V) hybride un petit groupe Diesel (200 à 500 kW) pour assurer la traction et l'alimentation des auxiliaires, soit une puissance totale de 1500 kW. RailPower dispose d'un brevet sur cette architecture d'hybridation et a négocié des licences d'explo-

Tab. 1.1: Les locomotives hybrides de RailPower

Performances	GG20B	RP20BH	RP20BD
PUissance DE TRACTION EMBARQUÉE	1500 kW	1500 kW	1500 kW
EFFORT AU DEMARRAGE	335 kN (≤ 10 km/h)	335 kN (≤ 10 km/h)	335 kN (≤ 10 km/h)
VITESSE MAXIMALE	96 km/h	105 km/h	105 km/h
EFFORT/VITESSE EN RÉGIME CONTINU	220 kN @ 22.6 km/h	235 kN @ 20.1 km/h	235 kN @ 20.1 km/h
PUissance DIESEL EMBARQUÉE	1 GE de 200 kW à 500 kW	2 GE de 500 kW	3 GE de 500 kW
BATTERIES EMBARQUÉES	plomb(VRLA), 1200 Ah, 700 V	plomb(VRLA), 600 Ah, 700 V	(Pas nécessaire)
RÉDUCTION DE LA CONSOMMATION DE GASOIL	40% à 60%	20% à 35%	20% à 35%
RÉDUCTION DA LA POLLUTION (NO _x + PARTICULES)	80% à 90%	80% à 90%	80% à 90%

tation avec plusieurs constructeurs ferroviaires dont ALSTOM et Bombardier. Le principal client de RailPower est l'Union Pacific Railroad aux USA. Plusieurs autres exploitants tels que Canadian Pacific Railway, BNSF Railway, Kansas City Southern Railway utilisent les produits de RailPower. Le fonctionnement d'une Green Goat est proche de celui d'un véhicule électrique, à la différence que la station de recharge est embarquée sur la locomotive. En effet, la locomotive fonctionne uniquement sur les batteries avec la possibilité de récupération de l'énergie au freinage. Le groupe Diesel tourne, au besoin, seulement pour charger les batteries. Ainsi le fonctionnement du groupe Diesel est en grande partie couplé de la consommation instantanée de puissance. Le groupe Diesel est alors réglé avec précision pour obtenir une efficacité optimale. Le niveau de charge des batteries varie entre 65% et 85%, soit un taux de décharge de 20%. Il en résulte un fonctionnement beaucoup plus silencieux, beaucoup plus efficace et beaucoup moins polluant que celui des locomotives de manœuvre Diesel traditionnelles. RailPower annonce une réduction de consommation fuel de 40% à 60%, une réduction des émissions de CO₂ de 40% à 70% et des émissions nocives (NO_x + Particules) de 80% à 90%.

La réduction des impacts environnementaux et l'économie de fuel qu'elles permettent rendent ces locomotives économiquement et écologiquement attractives. Néanmoins, l'utilisation des batteries électrochimiques, dans un contexte de traction pure, expose ces dernières à des pics de puissance répétés et à une multitude de microcycles, ce qui réduit



(a) Le CITADIS de Rotterdam



(b) Le volant d'inertie de CCM

Fig. 1.3: Le CITADIS de Rotterdam hybridé au volant d'inertie

sensiblement leur durée de vie. Les résultats de retour d'expérience sur les Green Goats sont gardés dans le plus grand secret mais, en coulisse, RailPower avoue travailler sur le prolongement de la durée de vie des batteries...

1.2.4 Les Citadis de Rotterdam et de Nice

Les Citadis de Rotterdam (figure 1.3a) et de Nice sont deux exemples d'hybridation particulièrement intéressants, notamment pour leur cahier des charges. Le Citadis de Rotterdam est un tramway normalement alimenté par caténaire, mais la ville de Rotterdam a spécifié que la traversée du pont Erasmus se fasse sans caténaire apparente qui risquerait de dénaturer le site. Le dilemme consistait alors à assurer une autonomie du tramway le temps de la traversée du pont. Le constructeur ferroviaire ALSTOM qui a remporté l'appel d'offre a proposé et réalisé un tramway hybride Caténaire - Volant d'inertie. Le volant d'inertie chargé, pendant la circulation en ville, prend la relève de la caténaire pendant la traversée du pont Erasmus. La présence du volant d'inertie, initialement pour la raison évoquée ci-dessus a donné l'idée de l'extension de son utilisation. En effet, le volant est sollicité même en présence de la caténaire pour lisser les demandes de puissance au démarrage et pour recycler, en local, l'énergie de freinage. Cette utilisation permet une stabilisation de la tension caténaire. Le volant d'inertie fabriqué par la société néerlandaise CCM (Center for Concepts in Mechatronics) a un volume de 1.7 m^3 périphérique compris pour une capacité de stockage de 5.33 kWh à 22000 tr/min et une puissance crête de 325 kW (voir figure 1.3b).

Pour les mêmes raisons, ALSTOM a construit à Nice un Citadis hybridé aux batteries NiMH pour la traversée des places Garibaldi (435 m) et Massena (485 m) à 30 km/h sans caténaire.

1.2.5 Le Mitrac Energy Saver de Bombardier

Conjointement avec MVV Energie basée à Mannheim (Allemagne), Bombardier a mis au point le tramway, appelé Mitrac Energy Saver, hybridé par des supercondensateurs. Cette

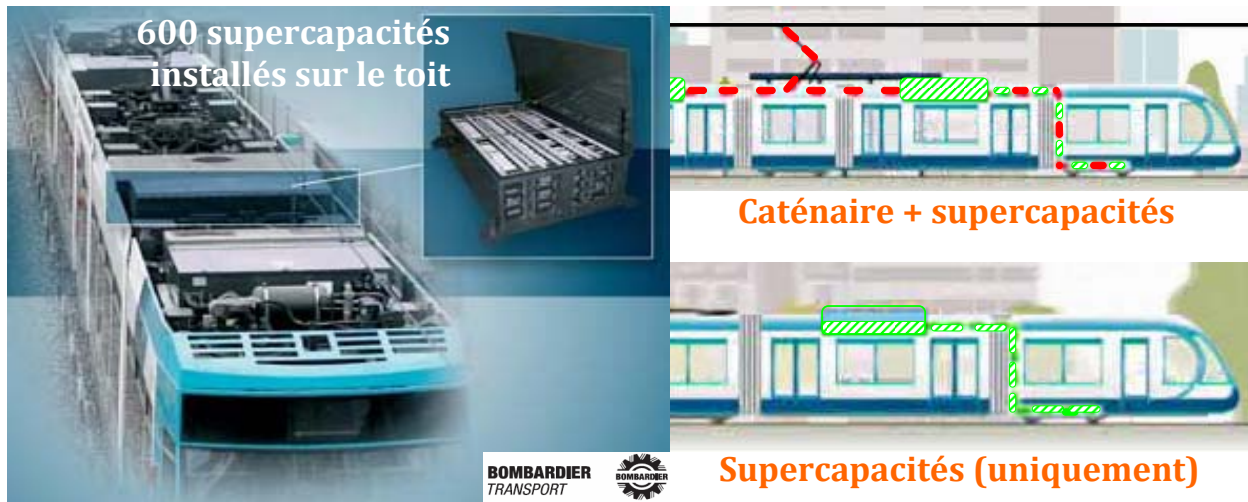


Fig. 1.4: Le Mitrac Energy Saver de Bombardier

hybridation permet de réduire les frais de service et d'améliorer la compatibilité environnementale. Pendant le freinage, les supercondensateurs stockent l'énergie cinétique. Lors d'un démarrage, elles délivrent cette énergie fournissant l'accélération requise. Le Mitrac Energy Saver embarque 600 éléments supercapacitifs (BCAP0008 de Maxwell Technologies) montés en série sur le toit (figure 1.4) et délivrant à pleine charge 750 V. Le pack de supercondensateurs est refroidi à l'air forcé [18].

Le Mitrac Energy Saver permet une économie d'énergie de 30%, une diminution de 50% de la puissance de pointe à fournir par le réseau et une réduction de l'ordre de 50% des chutes de tension caténaire. En effet, pour un courant typique de 1000 A, la chute de tension vue par le tramway peut s'élever jusqu'à 100 V. En réduisant les pics de courant, cette solution soulage la tension caténaire. Cette solution permet également de rouler à haute accélération maintenue sur 1000 mètres sans caténaire (figure 1.4), permettant de se dispenser de lignes lors de travaux, de gel ou afin de réduire la pollution visuelle près des sites historiques.

Ces quatre exemples de réalisations ne constituent pas une liste exhaustive des cas d'hybridation ferroviaire. Plusieurs autres projets ou exemples d'hybridation ferroviaire existent, notamment le jeTrain de Bombardier (turbine à gaz/volant d'inertie), le tram ULEV-TAP (Ultra Low Emission Vehicle) mis au point par ALSTOM et Turbomeca et testé à Karlsruhe (en Allemagne) et l'Avanto Light Rail Vehicle de SIEMENS (Diesel/volant d'inertie) pour ne citer que ceux-là.

1.2.6 Génération et stockage de l'énergie en ferroviaire

Dans cette sous-section, nous faisons une synthèse sur la génération et le stockage de l'énergie en milieu ferroviaire. Nous proposons une analyse succincte des moyens de génération de puissance utilisés en ferroviaire et l'évolution de ces moyens dans les années à venir face aux préoccupations environnementales et à la raréfaction des ressources pétrolières. Pour ce qui concerne les dispositifs de stockage, nous faisons un bilan rapide de

leur utilisation en ferroviaire. Puis, au vu des nouveaux besoins⁽¹⁾ et de l'amélioration des performances de certains dispositifs de stockage, nous essayons de dégager des tendances sur le transport du futur.

En Europe, l'électricité reste la principale source d'énergie en ferroviaire. D'après les responsables du réseau ferré français, le développement du réseau ferré correspond souvent à l'électrification des lignes. C'est donc une tendance qui se renforcera dans les années à venir. Actuellement, la France compte 14778 kilomètres de lignes électrifiées sur un réseau exploité de 29203 kilomètres. Plus de 85% du trafic fret et 90% du trafic voyageur sont écoulés sur la partie du réseau équipée de lignes électrifiées. Le réseau électrifié est aujourd'hui le seul réseau adapté à la grande vitesse pour laquelle les besoins en puissance peuvent monter jusqu'à 12 MW, voire plus. Mais l'électrification des lignes entraîne un investissement colossal : les réseaux non électrifiés ont donc encore de beaux jours devant eux. De plus, certains tronçons du réseau sont non électrifiables, notamment les terminaisons portuaires ou les gares de triage. Par ailleurs, quel que soit le type de réseau, les opérations de secours nécessitent des engins autonomes (souvent Diesel).

Malgré l'intensification de l'électrification du réseau ferré français, le besoin d'engins autonomes pour couvrir les lignes non électrifiées et les opérations de secours impose le recours à des engins Diesel. Aux États-Unis, les autorités ferroviaires ont fait le choix de garder les réseaux non électrifiés pour faciliter l'empilement de containers sur plusieurs mètres de hauteur à bord des trains fret. Ce choix impose une utilisation d'engins Diesel.

L'hydrogène est sans doute la meilleure technologie, qui concilie à la fois la sobriété en carbone pour la production d'électricité et une garantie d'autonomie qui se rapproche du Diesel⁽²⁾. La pile à combustible correspond bien à l'objectif « zéro émission » que visent les acteurs automobiles et ferroviaires. La technologie de pile la plus fréquemment utilisée est la PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) qui comporte en particulier une membrane échangeuse de protons, du platine pour catalyser la réaction globale :



Mais, en l'état, cette technologie est économiquement inabordable. Les constituants de la pile sont extrêmement coûteux. Une pile de 70 kW revient au prix d'une Ferrari Testarossa⁽³⁾, et on estime qu'il faudra diviser ce prix par au moins 100 pour parvenir à un produit commercialisable sur des voitures haut de gamme. La pile à combustible comme source d'énergie ferroviaire n'est donc pas économiquement envisageable dans le court terme. Cependant, une démocratisation de cette technologie, d'abord dans l'automobile, pourrait conduire à des prix de plus en plus abordables et faciliter son intégration en ferroviaire. Par ailleurs, des verrous technologiques liés à la sécurisation du stockage d'hydrogène à bord des trains et la durée de vie des piles pour le moment trop faible (même pour l'automobile) restent à lever.

⁽¹⁾L'hybridation ferroviaire entraîne de nouveaux besoins en matière de stockage de l'énergie

⁽²⁾Même si son stockage pose encore de réels problèmes

⁽³⁾Information extraite du <http://www.fuelcelltoday.com> consulté entre janvier et mars 2008

Le stockage de l'énergie en ferroviaire reste essentiellement électrochimique. La SNCF utilise essentiellement les accumulateurs au plomb et ceux au Nickel-Cadmium. Ces batteries sont utilisées pour le démarrage des moteurs thermiques, l'alimentation des auxiliaires (ventilateurs, compresseurs, lumières etc.), les équipements de confort des voyageurs et des équipements de signalisation. Le tableau 1.2 issu du livre de J. Rand [3] présente les différentes technologies de batteries candidates à la traction électrique. Même si les accumulateurs au plomb continuent à être utilisés pour leur faible coût (120 à 200 €/kWh) et les accumulateurs au nickel-cadmium pour leur durée de vie, ces deux technologies sont appelées à disparaître, le plomb pour sa faible densité d'énergie et le nickel-cadmium pour sa toxicité⁽¹⁾. La relève du plomb et du nickel cadmium s'installe progressivement dans le domaine de la traction électrique où trois nouvelles technologies d'accumulateurs électrochimiques émergent aujourd'hui.

Tab. 1.2: Principales caractéristiques des technologies de batteries

Technologie	Principaux avantages	Principaux inconvénients
plomb (VRLA)	Technologie industriellement mature – Faible coût – Sans entretien	Faible densité d'énergie – Durée de vie limitée (~ 500 cycles) – Performances dégradées aux températures négatives
nickel cadmium (NiCd)	Technologie industriellement mature – Bonne longévité	Densité d'énergie modérée – Performances dégradées au-delà de 35°C – Grande toxicité — Coût élevé
nickel zinc (NiZn)	Densité d'énergie raisonnable – Bonnes performances	Longtemps délaissée pour sa trop courte durée de vie (~ 300 cycles) – Mais a connu une nette amélioration depuis peu (> 800 cycles)
nickel métal hydrure (NiMH)	Densité d'énergie raisonnable – Haute densité de puissance – Bonne longévité – Tolérance aux surcharges et aux décharges profondes – sans maintenance	Fort taux d'auto-décharge – Sensible aux températures ambiantes élevées – Coût élevé
Lithium ion (Li-ion)	Haute densité d'énergie et de puissance – Bonne longévité	Pas encore mature – Coût élevé – Nécessité de recharge par contrôle de tension – Problème de sécurité

⁽¹⁾Le nickel-cadmium est déjà interdit au Japon et le sera d'ici quelques années en Europe.

Premièrement, il y a les accumulateurs nickel métal hydrure (NiMH). Ces accumulateurs ont été commercialisés au début des années 1990 au Japon. Ils sont le fruit de 20 ans de recherche après des travaux initiaux aux États-Unis. Ils constituent aujourd'hui un prolongement du nickel cadmium avec de meilleures caractéristiques intrinsèques (60 à 90 Wh/kg – 210 à 500 W/kg) et sont recyclables à 58%. Les accumulateurs NiMH supportent très mal les surcharges, la détection de la fin de charge est donc très importante. La technologie nickel métal hydrure (NiMH) est actuellement utilisée dans quelques applications ferroviaires. Elle équipe notamment le tramway de Nice et remplacera le nickel cadmium (équipant les TGV) sur les AGV (Automotrice Grande Vitesse). Pour optimiser sa durée de vie, il convient de climatiser l'enceinte du NiMH et d'éviter toute surcharge. Deuxièmement, il y a les accumulateurs lithium-ion. Cette technologie a fait l'objet d'un développement dans les années 1970. Ses caractéristiques intrinsèques en font un système rechargeable très prometteur (150 à 190 Wh/kg – 150 à 280 W/kg). Le Li-ion présente par contre un fort risque d'incendie. Son utilisation est en progression dans l'automobile. Il constitue très probablement l'accumulateur embarqué du futur (aéronautique et espace, transports terrestres, ...).

Les deux technologies précédemment citées ont l'inconvénient d'être très coûteuses (450 à 1000 €/kWh pour le NiMH et 1000 à 1800 €/kWh pour le Li-ion). Leur démocratisation en ferroviaire devrait attendre une utilisation plus répandue en automobile, qui pourrait les rendre économiquement plus attractives. Une technologie est aujourd'hui en cours de développement, qui pourrait séduire le ferroviaire. Il s'agit du nickel zinc (NiZn). Cet accumulateur fut décrit pour la première fois au Royaume-Uni en 1899 mais était alors peu maîtrisé. A l'issue de la première crise pétrolière dans les années 70, le couple NiZn connut une seconde vie liée à ses caractéristiques intéressantes (faible coût et densité d'énergie élevée) et de nombreuses études lui ont été consacrées. Il ne sera pourtant jamais commercialisé à une échelle significative faute d'une durée de vie trop faible. Le zinc est un matériau largement disponible, bon marché, recyclable et non polluant qui remplacerait donc avantageusement l'électrode de cadmium. Aujourd'hui, trois groupes proposent leur solution pour cette technologie : PowerGenix, en Californie, Xellerion à New York et S.C.P.S en France.

Après une dizaine d'années de recherche, la Société de Conseil et de Prospective Scientifique (SCPS) a mis au point de nouveaux additifs permettant d'améliorer la durée de vie du NiZn. SCPS propose aujourd'hui un module standard de 30Ah dont les caractéristiques, obtenues par le laboratoire des Renardières de EDF, sont résumées dans le rapport [19]. Le tableau 1.3 donne un aperçu rapide de ces caractéristiques. On note que le NiZn peut concurrencer le NiMH sur le plan de la densité d'énergie d'une part, et le Li-ion sur le plan de la puissance spécifique d'autre part. De plus, cette technologie est 4 fois moins chère que le NiMH et plus de 7 fois moins chère que le Li-ion, tout en ayant une durée de vie voisine sinon meilleure que celle du Li-ion. Le seul point d'ombre est qu'elle est fabriquée encore aujourd'hui de façon artisanale. Son industrialisation est attendue avec beaucoup d'impatience par la SNCF.

Tab. 1.3: Caractéristiques du module NiZn de 30 Ah développé par SCPS

Caractéristiques	Valeurs
Capacité nominale	30 Ah
Tension nominale du module	36 V
Tension nominal d'un élément	1.65 V
Densité d'énergie massique	70 à 80 Wh/kg
Densité d'énergie volumique	140 Wh/dm ³
Densité de puissance	400 W/kg
Résistance interne	2.2 mΩ
Nombre de cycles à C/3 en charge et décharge (80% DoD)	1000
Nombre de cycles à C en charge et décharge (80% DoD)	800
Nombre de cycles à C en charge et 3C en décharge (80% DoD)	600
Plage de température en fonctionnement	-20 à 55°C
Poids	0.81 kg
Prix	210 à 230 €/kWh

La domination du stockage électrochimique n'est pas totale en ferroviaire. D'autres solutions de stockage cohabitent avec les batteries. Il s'agit essentiellement des volants d'inertie et des supercondensateurs. L'utilisation des supercondensateurs dans le ferroviaire est en nette progression [18, 20, 21, 22, 23, 24]. Même si des réalisations industrielles – le Citadis de Rotterdam, le jetTrain de Bombardier – existent, le volant d'inertie dans le ferroviaire est encore au stade expérimental. Des problèmes de sécurité restent à résoudre pour la démocratisation de son utilisation en milieu ferroviaire.

1.2.7 Conclusion

Globalement, l'hybridation ferroviaire est d'abord motivée par des raisons écologiques, auxquelles nous pouvons associer la tranquillité des riverains. Ensuite, viennent des motivations économiques (économie d'énergie et de fuel) puis des raisons stratégiques (la préparation à l'« après pétrole »). Enfin, il y a la recherche d'autonomie. L'objectif « zéro pétrole » qui sera sans aucun doute la seule alternative dans les années à venir est économiquement utopique dans le contexte actuel où la pile à combustible est "hors de prix" et le problème du stockage de l'hydrogène n'est pas encore résolu.

1.3 Présentation du projet PLATHEE

1.3.1 Contexte du projet

Une étude comparative de l'impact climatique de trois modes de transport de personnes (ferroviaire, automobile et aérien), menée conjointement par la SNCF et l'ADEME [7, 8] montre que le transport ferroviaire se positionne mieux que l'automobile et l'aérien. Le tableau 1.4 montre les résultats de cette étude. Il apparaît que le transport ferroviaire

Tab. 1.4: Comparaison de trois mode de transport de personnes

Trajet en :	Train	Avion	Voiture
Paris - Nice	174.40 €	209.98 €	322.21 €
Durée du trajet	06h45min	01h35min	08h58min
Indice de CO ₂	10	206	373
Lyon - Lille	150.30 €	145.91 €	239.10 €
Durée du trajet	03h10min	01h15min	06h39min
Indice de CO ₂	9	165	277
Paris - Londres	70.00 €	109.00 €	121.36 €
Durée du trajet	01h40min	01h20min	05h03min
Indice de CO ₂	24	103	161

admet l'indice de CO₂⁽¹⁾ le plus faible. Cependant la SNCF souhaite poursuivre son effort de recherche scientifique pour améliorer le bilan énergétique de son parc de locomotives électriques et thermiques, mais aussi pour réduire les émissions de gaz à effet de serre et d'autres polluants gazeux et particulaires. C'est dans cet élan que s'inscrit le projet PLATHEE. A travers ce projet, la SNCF répond aux objectifs de l'appel à propositions lancé par l'ANR et l'ADEME dans le cadre du PREDIT.

Les solutions envisageables pour atteindre ses objectifs commencent par des perspectives sur les segments de missions hybridables, les moyens de production de l'énergie (groupe générateur de type industriel, groupe à biocarburants, pile à combustible, turbine à gaz etc.), les systèmes de stockage (batterie, supercondensateur et volant d'inertie) et les stratégies d'utilisation de l'énergie (récupération avec renvoi de l'énergie à la caténaire, recyclage de l'énergie à bord). Le projet PLATHEE propose ensuite l'adaptation de ces « briques technologiques⁽²⁾ » aux contraintes ferroviaires pour en assurer notamment la fiabilité et leur intégration sur une plate-forme de test pour rendre les engins ferroviaires de demain innovants et « durables » [25].

⁽¹⁾L'indice de CO₂ est exprimé en gCO₂/(voyageur.km) (www.voyages-sncf.com ou www.ademe.fr).

⁽²⁾Les termes « briques technologiques » désignent l'ensemble des technologies de génération et de stockage de l'énergie et des stratégies de gestion, impliqué dans l'hybridation ferroviaire.

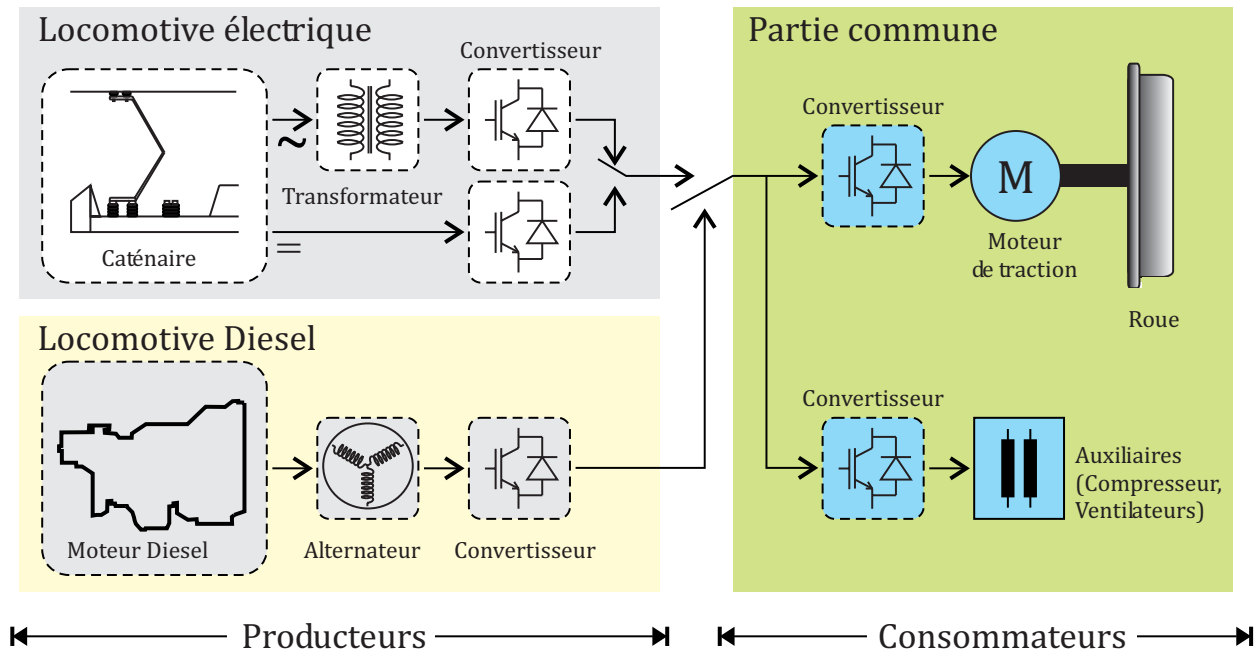


Fig. 1.5: Architecture actuelle des trains de la SNCF

1.3.2 Objectifs et enjeux

A partir des prospectives sur les « briques technologiques » hybridables, le projet PLATHEE étudie les solutions d'hybridation ferroviaire. Il s'agit donc de réexaminer la pratique actuelle qui consiste à produire l'énergie directement en fonction de la demande en puissance instantanée en recherchant d'autres manières d'assurer la même demande de consommation d'énergie à travers un nouveau système plus intelligent, mêlant production et stockage de l'énergie en fonction des conditions de production et de consommation, afin d'améliorer les performances énergétiques du train et de minimiser les impacts environnementaux. En effet, la figure 1.5 montre les deux architectures pratiquées à la SNCF. A bord des locomotives électriques, l'énergie est distribuée par prélèvement sur la caténaire à travers les pantographes, les transformateurs (si réseaux alternatifs) et des convertisseurs. Sur une locomotive Diesel, l'énergie est produite sur place par un générateur associé à un moteur thermique. Les deux architectures ont une partie commune constituée des moteurs de traction et des auxiliaires. Dans l'un ou l'autre des cas, la chaîne de production est surdimensionnée pour assurer la puissance crête de l'ensemble des consommateurs pour un besoin moyen relativement faible. Sachant que le volume des transformateurs croît avec les maxima de courant ou de puissance échangée, ce surdimensionnement est synonyme d'encombrement gênant [26]. De plus, le caractère intermittent de la consommation dans les trains (électriques) contribue à l'instabilité de la tension caténaire. C'est sur les locomotives Diesel qu'on enregistre le plus d'impacts négatifs dus à la rigidité de la liaison producteurs/consommateurs⁽¹⁾. La figure 1.6 montre un exemple de mission ferroviaire à laquelle doit répondre la locomotive hybride à concevoir. Il s'agit en l'occurrence d'une

⁽¹⁾Le terme "rigidité" traduit l'absence de tampon de stockage énergétique.

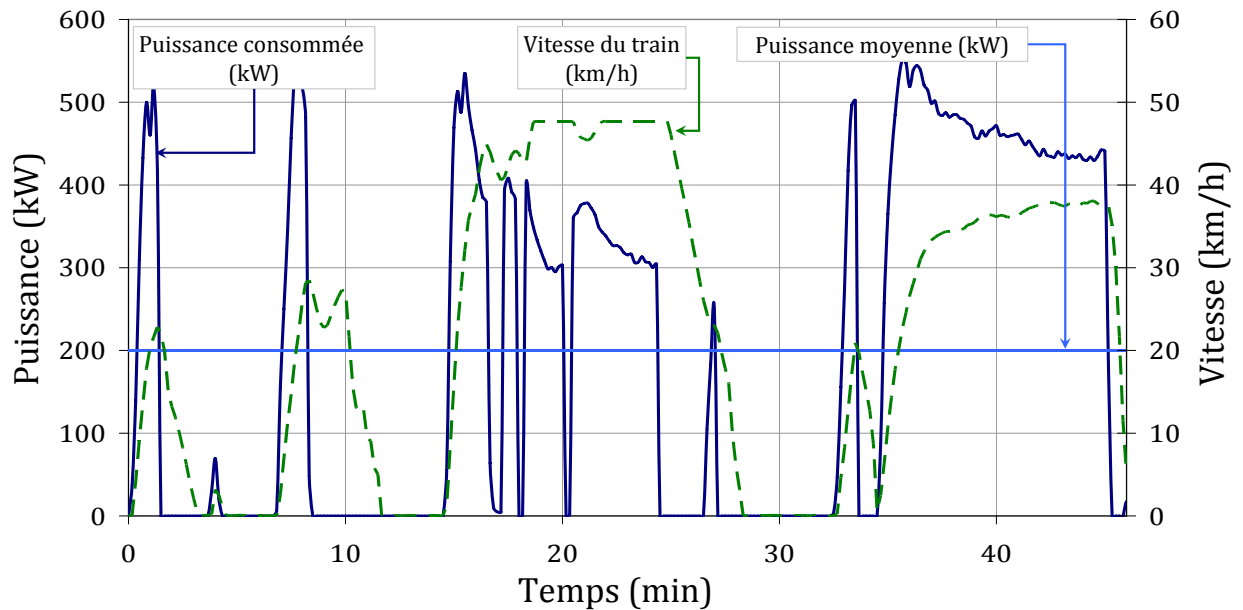


Fig. 1.6: Exemple de mission de desserte locale

mission de desserte locale⁽¹⁾ relativement difficile. Il apparaît clairement que, malgré la difficulté relativement élevée de la mission, la puissance crête d'environ 550 kW vaut plus de deux fois la consommation moyenne de la mission (200 kW). En d'autres termes, le moteur Diesel (de la BB 63000 concernée par cette mission) dimensionné à 610 kW est surdimensionné trois fois, pour un besoin réel n'excédant pas 200 kW. L'analyse de l'ensemble des missions de la BB 63000 (triaux et de dessertes locales) illustrée à la figure 1.7, montre que le groupe Diesel de la BB 63000 tourne 65% du temps au ralenti où la consommation et la pollution sont très pénalisantes, contre 15% seulement au point nominal où la consommation est optimale et la pollution moindre. De surcroît, le fonctionnement au ralenti entraîne l'encrassement du moteur thermique et une augmentation des fumées nocives. Cette analyse révèle donc une très mauvaise utilisation du groupe Diesel, en termes d'efficacité énergétique donc d'émission de CO_2 ⁽²⁾ et d'émissions nocives.

A la liste des gaspillages d'énergie, s'ajoute le fait qu'aucun dispositif de récupération de l'énergie de freinage n'est prévu, ni sur les locomotives électriques, ni sur les locomotives Diesel. Le freinage se fait donc par dissipation de l'énergie dans des résistances.

Une nouvelle génération de trains bi-modes (combinaison des deux architectures tout électrique + Diesel électrique) a été mise en circulation en France, courant 2007. Mise à part leur grande mobilité (tout le réseau ferré électrifié et non électrifié) ces trains n'apportent aucune solution aux problèmes identifiés ci-dessus.

Les pistes de réflexion pour l'amélioration de l'efficacité énergétique ferroviaire et la réduction des impacts environnementaux sont donc multiples. Le projet PLATHEE a pour objectifs :

⁽¹⁾ Les dessertes locales correspondent à des déplacements de marchandises entre deux villes relativement proches (moins d'une cinquantaine de kilomètres). Le "tonnage" remorqué n'excède pas les 400 tonnes.

⁽²⁾ La quantité de CO_2 émise est pratiquement proportionnelle à la quantité de fuel consommée

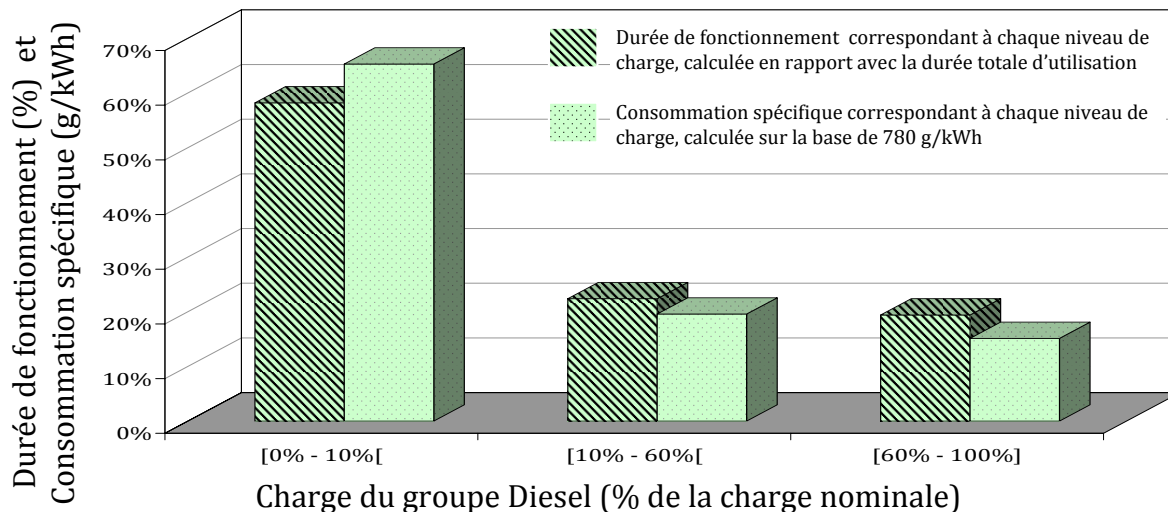


Fig. 1.7: Analyse de l'utilisation du groupe Diesel de la BB 63000

- d'identifier les briques technologiques appropriées, d'en optimiser le dimensionnement et l'utilisation afin de garantir notamment leur durée de vie à un coût maîtrisé ;
- d'étudier, voire de tester sur la plate-forme de tests modulaire, l'intégration de ces briques ;
- d'analyser les résultats, en vue d'une capitalisation du savoir-faire et d'orientation de choix tant pour du retrofit que pour la spécification de nouvelles acquisitions de matériel roulant.

Il ne s'agit donc pas de développer une solution particulière en vue d'une industrialisation à court terme, mais bien de défricher le vaste domaine offert par l'hybridation ferroviaire afin d'orienter des choix à plus ou moins long terme. Les finalités de cette démarche sont d'ordre stratégique pour un exploitant et mainteneur comme la SNCF. En effet, cette démarche s'inscrit dans la nécessité de bien se préparer aux évolutions des systèmes ferroviaires de demain :

- connaître les évolutions possibles (technologies, architectures, aides à la décision) ;
- définir le niveau de ses attentes (rédaction de cahiers des charges fonctionnels) ;
- sensibiliser en amont les acteurs industriels, en aval les clients et collectivités, aux solutions envisageables ;
- apprendre et maîtriser des technologies industrielles standards, non spécifiquement ferroviaires, afin d'améliorer la compétitivité du ferroviaire.

Pour ce faire, la SNCF devra capitaliser les résultats de ce projet, mettre en évidence les potentiels, avantages et inconvénients, avec le double point de vue d'exploitant et de mainteneur.

1.3.3 Briques technologiques hybridables

Trois principaux volets émergent des objectifs du projet PLATHEE : le premier volet concerne l'identification des « briques technologiques », le deuxième, l'étude expérimentale de différentes topologies d'hybridations ferroviaires et le troisième « volet segments

pour l'hybridation⁽¹⁾ » [25]. Ce dernier volet essentiel de la problématique d'hybridation qui nécessite une étude particulière, en dehors du cadre de cette thèse. Néanmoins, nous proposons à la section 2.2 une contribution intéressante à ce volet. Les grandes étapes du projet sont les suivantes :

Tout d'abord, il s'agit d'identifier les concepts d'hybridation applicables à un segment avec une combinaison particulière d'éléments de stockage ; cette étude permettra donc d'identifier les briques technologiques à la base de l'hybridation. De l'étude de faisabilité sur des cas particuliers, sortira une vision plus précise de ce que peut être l'hybridation dans le ferroviaire. La plate-forme de démonstration LHyDIE qui sera utilisée pour tester l'intégration des briques technologiques est en cours de développement. La première configuration testée sera celle de la locomotive Diesel de manœuvre avec supercondensateurs et batteries. En mettant en œuvre cette plate-forme, dans la première configuration décrite, un premier état de connaissances techniques (composants de stockage, nouvelle motorisation à biocarburants, gestion de l'énergie) sur l'hybridation d'un engin thermique de manœuvre va alors être atteint. Avec le groupe électrogène industriel utilisé, la SNCF espère alors être en deçà des limites d'émission de la future norme EURO 5 pour les poids lourds, dont l'application est prévue pour le 1^{er} octobre 2009 (soit en g/kWh : NO_x :2, CO :1,5 , HC :0,46, particules :0,02) ainsi que celles imposées par la communauté européenne pour les petites motorisations du domaine ferroviaire.

Ensuite, la plate-forme de démonstration sera utilisée pour tester ce nouveau moyen de stockage qu'est le volant d'inertie. Ce volant d'inertie sera développé et mis au point dans le projet SEVIT⁽²⁾ déposé par ALSTOM au même appel à proposition du PREDIT.

Enfin, un bilan technico-économique de l'hybridation sera proposé pour sensibiliser plus efficacement les acteurs industriels en amont, et les clients et collectivités en aval, à ces solutions envisageables.

1.3.4 Le consortium de partenaires

Le projet PLATHEE est aussi un consortium de partenaires qui couvre un éventail considérable de compétences dans le domaine ferroviaire, de la génération, de la conversion et du stockage de l'énergie. Chacun des partenaires intervient sur une ou un ensemble de tâches selon sa spécialité et le cahier des charges qui lui est assigné. De manière générique, on peut définir les rôles des différents partenaires de la manière suivante :

◆ La SNCF, chef de file du partenariat, assure la mission de gestion du projet. Elle contribue directement aux travaux à travers la définition de ses besoins (définition des segments de missions ...) mais également de manière concrète avec l'installation des équipements sur la plate-forme LHyDIE, la réalisation des essais et de leurs analyses. Plusieurs départements de la SNCF sont mis à contribution dans ce projet. La Direction de l'Innovation et de la Recherche à Paris est le maître d'ouvrage ; la Direction du Matériel, CIM

⁽¹⁾Il s'agit de l'identification des segments de missions plus aptes à l'hybridation.

⁽²⁾SEVIT : Stockage d'Energie par un Système de Volant d'Inertie optimisé pour des applications de Transport Ferroviaire

est maître d'œuvre. Ce projet s'inscrit aussi dans la continuité des expériences passées et récentes notamment à travers les projets THALES⁽¹⁾ et SPACT'80⁽²⁾.

◆ L'INRETS, à travers la Direction Technique du projet, est le garant de la cohérence scientifique et technique des travaux. Il a spécifiquement en charge les études liées aux différentes technologies de stockage, notamment les aspects de durée de vie, et il participe également à l'études des architectures de puissance.

◆ Le groupe de recherche G-ENESYS du LAPLACE⁽³⁾, laboratoire sur le site de l'EN-SEEIHT est en charge des schémas de puissance, de la gestion de l'énergie au niveau système et de l'optimisation de ces derniers pour les nouveaux concepts d'hybridation (par exemple : nouveau schéma de puissance pour une hybridation de matériel électrique alimenté sous 1500 V).

◆ 2HEnergy réalise pour ce projet un groupe électrogène embarqué avec une supervision optimisée afin d'en améliorer le rendement et diminuer les émissions polluantes et adaptera le moteur pour fonctionner aux biocarburants.

◆ ERCTEEL assure l'association à grande échelle des composants de stockage capacitifs et l'étudie la fiabilité et la mise en sécurité du système.

◆ ALSTOM intervient pour l'intégration du volant d'inertie à bord de la plate-forme de démonstration. Le développement et la mise au point de ce volant seront menés dans le cadre du projet SEVIT répondant également à l'appel à proposition du PREDIT. Les projets PLATHEE et SEVIT présentent donc une étude commune, à savoir une étude de faisabilité de l'intégration du volant sur une locomotive hybride.

◆ SOCOFER intervient en tant qu'intégrateur ferroviaire et Soprano pour l'informatique à bord de la locomotive hybride LHyDIE.

1.4 Cahier des charges et démarches scientifiques entreprises

1.4.1 Cahier des charges de cette étude

Le cahier des charges proposé par la SNCF comprend deux principaux volets. Le premier est un soutien scientifique et technique à la réalisation du prototype de locomotive LHyDIE. L'objectif est de participer directement à la conception du démonstrateur à l'échelle réelle de LHyDIE et d'un mini-banc à l'échelle $1/4$. Le deuxième volet du cahier des charges spécifie une contribution à la conception systémique de locomotives hybrides, à travers deux démarches concurrentes de conception systémique. La finalité de ce deuxième volet est de permettre à la SNCF d'acquérir le "savoir-faire" en matière de rédaction de

⁽¹⁾THALES : Tram-train Hybride à Alimentation Electrique par Supercondensateurs. Le projet, mené jusqu'en 2004 par un partenariat composé de ALSTOM, CONNEX, EDF, INRETS ; RATP et SNCF, a bénéficié d'une aide du Ministère des Transports après labellisation par le Groupe 10 du PREDIT.

⁽²⁾SPACT80 : Système de Pile A Combustible pour le Transport de 80 kW. Le projet, mené actuellement par un partenariat composé de CEA, CNRS, DGA, HELION, INRETS, L2ES, SNCF, bénéficie d'une aide du Ministère de la Recherche après labellisation par le Réseau PACo et le réseau PAN'H.

⁽³⁾LAPLACE (Laboratoire Plasma et Conversion d'Énergie) ; G-ENESYS (Groupe de recherche en Énergie Électrique et Systémique)

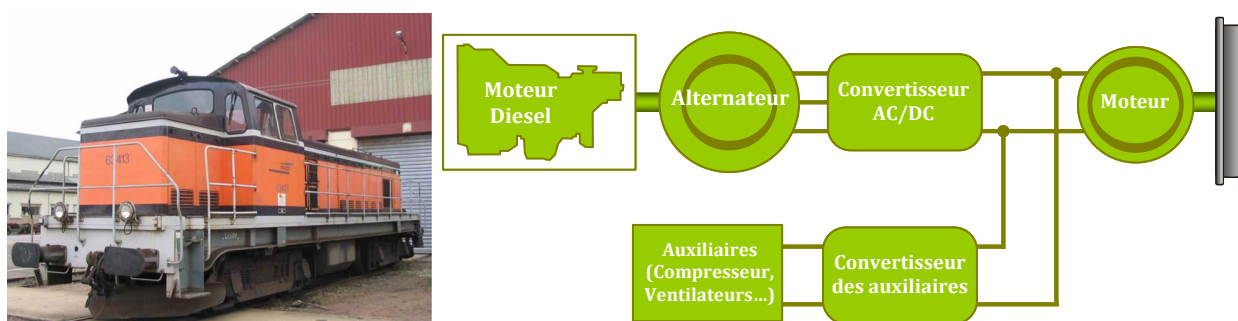


Fig. 1.8: La BB 63413 (ici à l'EIMM du Mans) et son architecture électrique

cahier des charges pour les futures acquisitions d'engins hybrides.

Dans le premier volet du cahier des charges, la SNCF spécifie la remotorisation partielle d'une BB 63000. La BB 63000 est une locomotive Diesel-électrique⁽¹⁾ mue par quatre bogies moteurs de 100 kW chacun. Les moteurs de traction sont des machines à courant continu. Comme le montre la figure 1.8, l'architecture électrique de la BB 63000 est extrêmement simple. L'alimentation des moteurs de traction et des auxiliaires est assurée par un groupe Diesel de 610 kW. Ces locomotives évoluent le plus souvent sur des gares de triage, sont utilisées pour des dessertes locales, ou participent à des opérations de secours en absence de caténaire. L'absence de tout tampon de stockage énergétique⁽²⁾ impose un fonctionnement permanent du groupe Diesel, même quand la locomotive est en arrêt, pour alimenter les auxiliaires (le compresseur et les ventilateurs).

La remotorisation partielle de la BB 63000 consiste au remplacement du groupe Diesel de 610 kW par un plus petit groupe Diesel auquel sont associés un pack de batteries et un pack de supercondensateurs, sans changer les blocs de traction de la locomotive. La figure 1.9 montre l'architecture proposée par la SNCF : un bus continu central, auquel sont connectées les sources d'énergie et les blocs de traction et les auxiliaires. Toutes les liaisons au bus continu sont faites à travers des convertisseurs. Le module de gestion énergétique, en agissant sur les convertisseurs, gère la participation de chacune des sources d'énergie. La SNCF nous a confié le dimensionnement des sources, la définition et le développement de la stratégie de gestion énergétique.

Le deuxième volet du cahier des charges est une contribution scientifique à la capitalisation du "savoir-faire" industriel en termes de rédaction de cahier de charges et d'analyse des futures offres de locomotives hybrides. La SNCF souhaite que notre étude fasse ressortir les tendances prometteuses sur l'hybridation ferroviaire, les configurations et les technologies adéquates selon les segments de missions.

Pour mener à bien cette étude, nous disposons d'une base de données de 16 missions ferroviaires dont 15 missions de desserte locale et de triage et une mission de transport

⁽¹⁾ Les expressions "locomotive Diesel" et "locomotive Diesel-électrique" ont la même signification dans ce rapport.

⁽²⁾ Il y a en réalité une batterie de 72 V, mais elle est consacrée uniquement à l'alimentation des circuits BT de la locomotive.

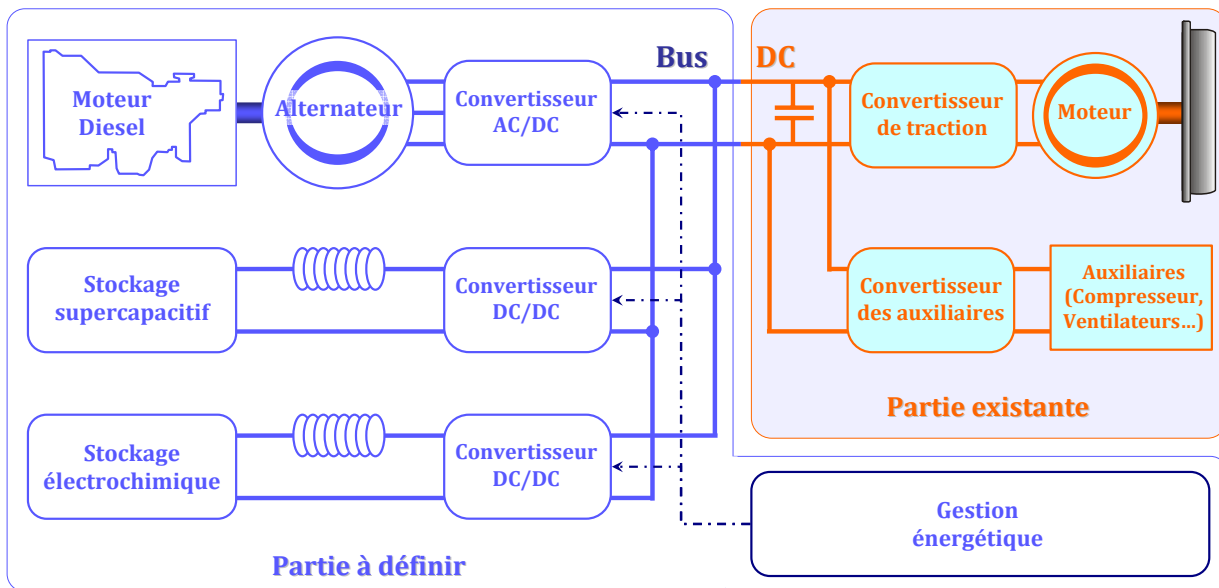


Fig. 1.9: Architecture fonctionnelle de la locomotive hybride LHyDIE

urbain en omnibus. Ces missions sont données à l'annexe A (page 211). Comme le montre la figure 1.10, la BB 63000 nous offre un volume réduit de 39 m^3 pour l'ensemble des équipements dont 32 m^3 seulement pourront accueillir les sources d'énergie, leurs convertisseurs et le système de ventilation. La conception du démonstrateur LHyDIE se fait donc sous la contrainte stricte de faire "rentre" l'ensemble des équipements conservés sur la vieille BB 63000 (réservoirs d'air, batterie BT de 72 V, ...) et des nouveaux équipements (groupe Diesel, pack de batteries, pack de supercondensateurs, convertisseurs, système de refroidissement), dans un volume exigu de 32 m^3 .

1.4.2 Démarches scientifiques entreprises

Pour répondre au cahier des charges décrit ci-dessus, nous avons organisé l'étude en deux phases distinctes : une première phase plus adaptée à notre implication dans la définition du démonstrateur LHyDIE et une deuxième plus globalisante qui pose et apporte des réponses au problème de l'hybridation ferroviaire selon des critères économiques et environnementaux.

La première phase d'étude selon une approche de « conception séquentielle » a permis, à partir de l'architecture pré définie, de synthétiser une stratégie de gestion d'énergie puis de dimensionner les éléments de la locomotive. Les chapitres 3, 4 et 5 traitent de cette première phase. Dans cette phase d'étude, nous avons mis en évidence la nécessité "d'utiliser le bon modèle au bon moment", c'est-à-dire de mettre en bonne adéquation modèles et phase de conception [27]. Nous avons ainsi présenté plusieurs niveaux de modélisation, chacun étant associé à une phase de conception particulière. A partir de ces modèles à niveau de granularité variable, nous avons présenté et validé l'architecture, le dimensionnement et la gestion système de la locomotive LHYDIE. Comme le montre la figure 1.11, à l'aide d'itérations successivement basées sur des modèles de synthèse et de

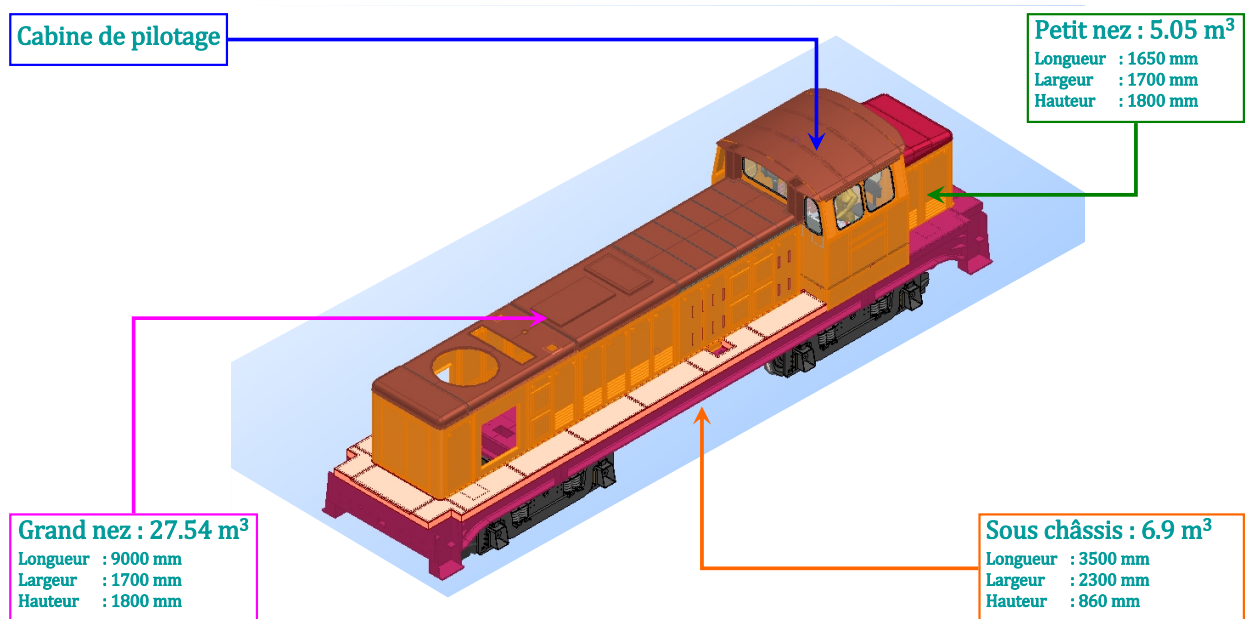


Fig. 1.10: Encombres disponibles sur une BB 63000

modèles d'analyse⁽¹⁾, nous avons interagi avec les différents partenaires pour spécifier plus précisément les différentes sources et accessoires de la locomotive : batteries, supercondensateurs, convertisseurs, régulation et puissance de calcul informatique. Cette démarche nous a permis d'intervenir en temps réel dans le processus de conception et de réalisation du prototype LHyDIE. De plus, par sa structure séquentielle, cette démarche offre une certaine souplesse par apport à l'incomplétude des données et des modèles disponibles au début du projet⁽²⁾. Cette phase d'étude a été riche d'enseignements sur les contraintes technologiques inhérentes à l'hybridation ferroviaire et constitue une avancée essentielle vers la spécification industrielle de la locomotive hybride.

La seconde phase d'étude reprend le problème selon une démarche de « conception simultanée », basée sur un modèle systémique dimensionnel couplé à un outil d'optimisation multicritère. Cette approche se justifie par le couplage conceptuel entre les questions d'architecture, de gestion et de dimensionnement, couplage matérialisé par les intersections des trois cercles de la figure 1.11. Venant à la suite de la première démarche, cette nouvelle approche a bénéficié d'une meilleure connaissance des éléments, de modèles plus riches et plus élaborés et du recul nécessaire pour une analyse plus fouillée. Cet outil permet d'effectuer simultanément différents choix paramétriques inhérents aux dimensions, mais aussi à la stratégie de gestion voire à l'architecture système. Les principaux critères visés sont la consommation et la pollution, la durée de vie des composants (de stockage en particulier) et le coût système. La finalité de cette dernière démarche est de dégager, selon les segments

⁽¹⁾ Les modèles de synthèse permettent d'effectuer des choix de dimension ou de paramètres de gestion du système à partir des missions, alors que les modèles d'analyse permettent d'assurer que le système dimensionné assure les missions.

⁽²⁾ Nous avons, au fur et à mesure que le projet avance, enrichi nos modèles en allant chercher les données auprès des partenaires.

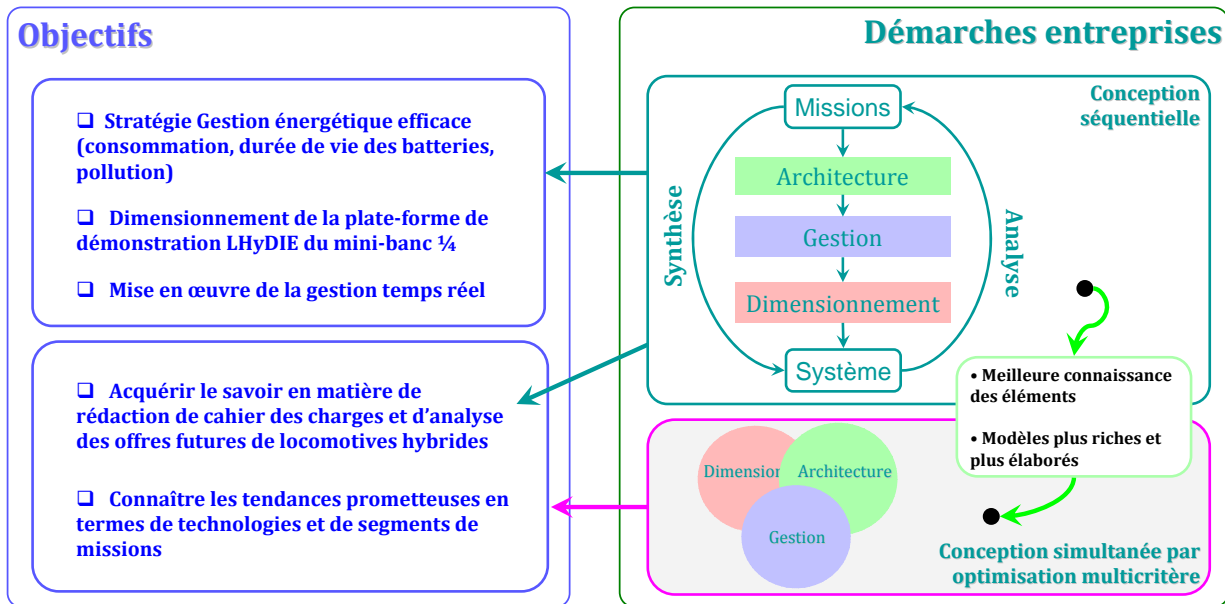


Fig. 1.11: Démarches scientifiques entreprises

de missions, des tendances pertinentes sur les configurations et les technologies les plus adaptées à l'hybridation ferroviaire.

1.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fait le tour de l'état de l'art de l'hybridation ferroviaire, de la gestion et du stockage de l'énergie dans le domaine ferroviaire. Les exemples étudiés montrent qu'un intérêt certain est porté à l'hybridation un peu partout à travers le monde. Ceci devrait s'accroître avec la crise persistante du pétrole. Nous avons également présenté le projet dans le cadre duquel est effectuée la présente étude. En ambitionnant d'associer deux technologies de stockage à un groupe Diesel de puissance réduite, ce projet représente un challenge jamais encore essayé. La difficulté de ce projet ne réside pas seulement dans le fait d'associer plusieurs sources d'énergie, mais surtout dans le fait de faire fonctionner ces sources d'énergie en cohérence et en adéquation avec les caractéristiques intrinsèques de chacune d'elles. C'est ce qui fait de la stratégie de gestion une pièce centrale de ce projet.

Chapitre 2

Nouvelle approche de la notion de mission : application au ferroviaire

2.1 Introduction

L'hybridation est un nouveau défi aux pratiques ferroviaires traditionnelles. Nous montrons, à travers ce chapitre, les limites des techniques traditionnelles de caractérisation et d'analyse des missions ferroviaires dans une perspective d'hybridation. Nous proposons une nouvelle approche permettant d'appréhender la notion mission de façon plus adaptée à la problématique de l'hybridation. En particulier, nous proposons une application de cette approche aux missions ferroviaires. La première section de ce chapitre traite de la dynamique des trains. Il s'agit d'un rappel des techniques traditionnelles de spécification des locomotives électriques et Diesel. La seconde section présente notre nouvelle approche de la notion de mission.

2.2 La dynamique des trains

Dans son support de cours sur le ferroviaire, Alain Jeunesse explique [28] : *"la définition des caractéristiques générales d'un engin moteur exige au préalable la connaissance complète du programme de traction auquel il devra satisfaire"*. Généralement, ce programme est spécifié dans le cahier des charges par la donnée de plusieurs informations dont les plus importantes sont : les types de train à remorquer, avec leur masse, l'effort au démarrage nécessaire, les profils de ligne susceptibles d'être rencontrés, la vitesse maximale, l'effort résiduel à la vitesse maximale. Ces informations sont utilisées pour la spécification des caractéristiques ci-après : les efforts nécessaires à la marche du train, l'adhérence, le couple moteur, la puissance de traction et la caractéristique effort-vitesse. Dans cette section, nous montrons à travers la présentation succincte de ces caractéristiques, com-

ment la spécification de profils de ligne, de vitesse et de charge permet de "remonter" au dimensionnement de l'engin et à la programmation des horaires des trains.

2.2.1 Efforts nécessaires à la marche du train

Les efforts nécessaires à la marche du train sont donnés par l'équation fondamentale de la dynamique des trains :

$$F_j = R + Mgi' + kM\gamma \quad (2.1)$$

Le terme F_j (exprimé en kN) correspond à la somme des efforts aux jantes. Elle exprime la force totale que doit développer l'engin à ses jantes pour déplacer le train sur un profil (de pente) i' (‰) avec une accélération γ (m.s^{-2}). Le terme R (exprimé en kN) est la résistance à l'avancement (RAV). R exprime les efforts résistants à vaincre pour faire rouler un train à une vitesse V donnée en palier.

$$R = A + BV + CV^2 \quad (2.2)$$

Le coefficient A représente les frottements dans les boîtes d'essieux et la résistance au roulement sur les rails. Ce coefficient dépend de la masse du train et du nombre d'essieux. Le terme BV représente les efforts de frottement des boudins de roue contre le champignon des rails et le terme CV^2 la résistance aérodynamique du train qui dépend :

- de l'action de l'air sur la face frontale ;
- de l'effet de l'écoulement de l'air le long des parois
- des turbulences dues aux césures entre véhicules et celles qui se produisent sous le train entre la voie et les dessous de caisse ;
- de toutes les imperfections aérodynamiques.

Les paramètres A , B et C sont déterminés par des essais minutieux [28]. La RAV est l'obsession des acteurs ferroviaires, car elle constitue un poste important de consommation d'énergie [28, 29, 30, 31]. Le terme Mgi' représente la force résistante due au poids Mg de l'engin, compte tenu de la pente du profil de ligne et de la courbure des rails (i' exprimé en ‰). Le paramètre i' communément appelé profil corrigé, est de l'ordre de 8 à 10‰ sur les lignes classiques. Le profil i' est plus sévère sur les lignes à grande vitesse (LGV). Il monte à 35‰ (rampe du « Bois Clair ») sur 6 km sur la ligne TGV PSE⁽¹⁾. Enfin, le terme $kM\gamma$ représente l'effort nécessaire pour accélérer une masse kM avec une accélération γ (m.s^{-2}). kM est une masse fictive représentant la somme des masses roulantes ramenée aux jantes motrices. k varie de 1.10 à 1.30 pour une locomotive et vaut 1.04 pour un TGV. Le tableau 2.1 montre quelques exemples de formules de résistance à l'avancement (RAV). Quelques profils de ligne et de vitesse sont donnés à l'annexe A.1 (page 211).

⁽¹⁾TGV-PSE (Paris-Sud-Est) : tricotant (1500 Vcc, 15 kV, 25 kV) construit entre 1978 et 1988, 6420 kW de puissance maximale.

Tab. 2.1: Quelques exemples de formules de résistance à l'avancement (RAV)

Type de matériel	Masse en (tonne)	Formule RAV (daN)
TGV Réseau	416	$250+3.30V+0.0510V^2$
TGV Duplex	424	$270+3.20V+0.0535V^2$
EUROSTAR	816	$480+6.50V+0.1050V^2$
Z20500 (M+2R+M)	298	$180+2.90V+0.0560V^2$
X72500 (M+R+M)	178	$200+1.78V+0.0359V^2$
CC 72000	114	$150+1.14V+0.0300V^2$

2.2.2 Sollicitation d'adhérence μ

La sollicitation d'adhérence est le rapport entre l'effort maximal transmissible aux roues motrices et la force adhérente au rail due à la masse de l'engin [28].

$$\mu = \frac{1}{Mg} \cdot F_{j\max} \quad (2.3)$$

La valeur de μ dépend de l'état du rail. Sur rail sec, la valeur de μ peut atteindre 30% à 35% voire 40%. Sur rail mouillé, avec éventuellement des feuilles mortes μ peut descendre en dessous de 10%. A grande vitesse, le niveau d'adhérence se réduit à 10% environ. La technique du sablage devant les roues motrices permet de relever le niveau d'adhérence sur zones humides et glissantes. La sollicitation d'adhérence est un facteur important à prendre en compte dans la gestion des efforts transmis aux roues motrices et la gestion du freinage pour éviter un glissement excessif des roues sur les rails.

2.2.3 Caractéristique effort-vitesse $F(V)$

La puissance à la jante s'écrit de la manière suivante :

$$P_j = \frac{1}{3.6} \cdot F_j V \quad (2.4)$$

avec : P_j en kW, F_j en kN et V en km/h

D'après les équations Eq.2.1 et Eq.2.2, l'équation précédente peut s'écrire :

$$P_j = \frac{1}{3.6} \left((A + Mgi' + kM\gamma)V + BV^2 + CV^3 \right) \quad (2.5)$$

Dans cette dernière expression, le terme CV^3 domine asymptotiquement les autres termes. En d'autres termes, la puissance jante P_j augmente avec le cube de la vitesse. Ainsi l'augmentation de la vitesse d'un TGV a une incidence importante sur la puissance de traction et donc sur les infrastructures de distribution de type caténaire et sous-station. Pour ce qui concerne le fret, c'est plutôt la masse remorquée qui joue à travers la force à la jante F_j (Eq.2.1 et Eq.2.4). Généralement, le dimensionnement de la chaîne de traction se fait à

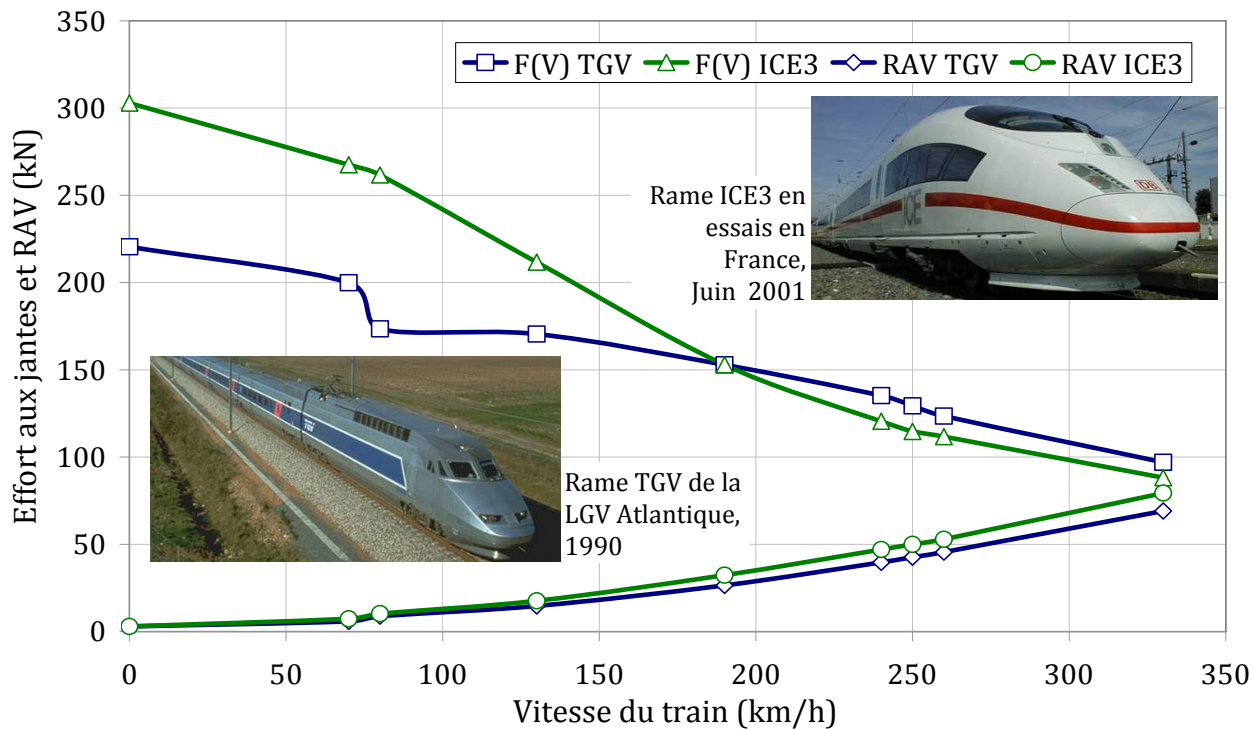


Fig. 2.1: Caractéristiques comparées effort-vitesse de l'ICE3 et du TGV PBKA

partir du programme $F(V)$ donnant la force maximale aux jantes $F_{j\max}$ en fonction de la vitesse V . La figure 2.1 est le résultat d'une étude comparative entre une rame ICE 3⁽¹⁾ et une rame TGV PBKA⁽²⁾. Au delà des légères différences de performances entre les rames française et allemande, il apparaît sur cette figure qu'aux vitesses élevées la RAV est le poste essentiel de consommation sur ces rames. Beaucoup d'efforts sont encore à fournir pour réduire les frottements dans les boîtes d'essieux, la résistance au roulement sur les rails, la résistance aérodynamique des trains et améliorer le contact roue-rail, sans oublier les systèmes de sécurité [28, 29, 30, 31]. C'est le prix à payer pour rendre le ferroviaire plus compétitif face à l'aéronautique.

2.2.4 Conclusion

Notons, pour conclure sur la dynamique des trains, que la chaîne de calculs qui permet de remonter des profils de ligne, des programmes de vitesse et des performances des chaînes de traction à la consommation de puissance d'un train est bien maîtrisée par les exploitants ferroviaires à travers l'utilisation de logiciels spéciaux (comme THOR⁽³⁾ à la SNCF). Dans la perspective de l'hybridation ferroviaire, la question se pose sans doute de savoir si l'ensemble de ces procédés est adapté. Pour le court terme, il nous semble intéressant

⁽¹⁾L'InterCityExpress (ICE) est l'offre "premium" de la Deutsche Bahn, la compagnie de chemin de fer allemande, et désigne à la fois le train en tant que matériel et la ligne commerciale sur laquelle le train circule.

⁽²⁾Les TGV PBKA sont des TGV quadricourant destinés au trafic international en France, Belgique, Allemagne et Pays-Bas.

⁽³⁾THOR est un logiciel de calcul des horaires développé en interne à la SNCF

de partir de ces acquis pour aborder la problématique de l'hybridation, même s'il nous semble indispensable à long terme de revenir sur les techniques de conduite qui ont une importance capitale dans la conception des trains hybrides. L'éco-conduite dans le ferroviaire pourrait être un thème de recherche intéressant dans les années à venir. Dans une première étape, la SNCF envisage de conserver la chaîne de traction initiale (motorisation à courant continu) sur la locomotive à hybrider, ce choix permettant un gain de temps de conception considérable dans le cadre de ce projet. La connaissance de la consommation de puissance sur la locomotive étant largement suffisante pour l'hybridation énergétique, il n'est donc pas nécessaire de partir du programme de traction complet (profil de ligne, charge et profil de vitesse). Pour les besoins du projet PLATHEE, une campagne de mesures a été mise en place et a permis d'enregistrer la consommation de puissance à bord de la BB63413 évoluant sur des triages et des dessertes locales. C'est sur la base de ces missions enregistrées que s'appuie la démarche d'hybridation.

2.3 Caractérisation et classification des missions ferroviaires

La faisabilité de la conception d'un véhicule hybride dépend en grande partie de la nature de la mission spécifiée par le cahier des charges. En général, le cahier des charges ne spécifie pas qu'une seule mission mais plutôt un ensemble de missions. Dans le cadre du projet PLATHEE, la locomotive BB 63000 qui sert de base à la locomotive LHyDIE est une locomotive Diesel utilisée pour des missions de triage⁽¹⁾ et de desserte locale⁽²⁾. D'une façon générale, les missions ferroviaires sont réparties en segments de missions. Les segments les plus connus sont :

- les triages, les dessertes locales et les manœuvres (< 1000 kW, < 80 km/h) ;
- les transport urbains en omnibus, banlieue parisienne (< 1000 kW, 120 km/h) ;
- les dessertes régionales (< 2000 kW, 200 km/h) ;
- les grandes lignes voyageur (4 à 5 MW, 200 km/h) ;
- le fret (3 à 6 MW, 2000 tonnes, 100 km/h à 200 km/h) ;
- le segment TGV (3 à 9.3 MW, 300 km/h) ;

De nouvelles missions sont en cours d'identification actuellement à la SNCF, telles que les auxiliaires TGV ; les tampons énergétiques pour le lissage de la consommation en sous-station. Le ferroviaire compte donc une panoplie de segments de missions qui, à leur tour, peuvent contenir chacun plusieurs missions différentes selon le profil du trajet, le type et le tonnage du convoi remorqué. Dans la perspective de l'hybridation ferroviaire, plusieurs questions surviennent face à cette multiplicité des missions et des segments :

1. Le partitionnement actuel en segments des missions ferroviaires est-il adapté à la démarche d'hybridation ?
2. Quelles missions (ou segments de missions) seraient plus adaptées à l'hybridation ?
3. Comment déterminer si une mission est hybridable, au sens de la faisabilité technologique, économique et climatique ?

⁽¹⁾Il s'agit de la formation des trains des convois de fret

⁽²⁾La desserte locale est une mission de transport de marchandises entre deux gares voisines ou chez les clients (peugeot, renault, ...) vers les gares de triage pour la formation des convois fret

4. Quels modes de conduite, respectant les contraintes de sécurité et de tracé des horaires seraient plus adaptés aux engins hybrides ?

Les trois premières questions posent le problème de la caractérisation et de la classification des missions ferroviaires dans la perspective de l'hybridation ferroviaire. La dernière question pose le problème de l'éco-conduite dans le domaine ferroviaire. Question légitime et intéressante sans doute, mais trop complexe pour être traitée dans le cadre ce travail. Nous abordons dans cette section la problématique de la caractérisation et de la classification des missions ferroviaires. Nous montrons comment il est possible, à partir d'un jeu d'indicateurs bien ciblés, de caractériser les différents segments de missions et d'évaluer la faisabilité de l'hybridation ferroviaire sur ces segments.

Avant d'aller plus loin, il convient de clarifier le sens de certaines notions abordées dans ce rapport. Il s'agit notamment des notions de "source de puissance" et de "source d'énergie" et de la notion de véhicule hybride.

Nous désignons par "source d'énergie électrique", une source pouvant délivrer une puissance électrique moyenne donnée, sur une durée du même ordre de grandeur que celle de la mission typique que doit assurer le système. C'est le cas du groupe Diesel et de la pile à combustible. Même si ces éléments sont dimensionnés par la puissance qu'ils sont amenés à fournir, ils fournissent la totalité de l'énergie nécessaire à la mission. C'est pour cela qu'ils sont qualifiés de "sources d'énergie".

Nous désignons par "source de puissance électrique", une source dont le bilan énergétique est nul, aux pertes près, sur la durée totale de la mission typique du système. Ainsi, les éléments de stockage, batteries, volants d'inertie et supercondensateurs, relativement à une mission de véhicule hybride autonome (nous définissons plus bas la notion de véhicule hybride autonome), sont des sources de puissance.

La notion d'hybridation est vague et peut couvrir une panoplie de situations très différentes les unes des autres. Dans ce rapport, nous entendons par "hybridation" une association entre générateur d'énergie primaire et système de stockage. Nous pourrions parler plus clairement d'"hybridation par stockage". En ce sens, la locomotive bi-mode Diesel-électrique⁽¹⁾ de Bombardier n'est pas une véritable locomotive hybride. Même définie ainsi, l'hybridation par stockage peut se décliner en deux versions différentes. Il y a les véhicules hybrides autonomes, dont la seule véritable source d'énergie est le générateur d'énergie primaire, le stockage servant de tampon énergétique local : c'est le cas du démonstrateur LHyDIE concerné par cette étude. A l'opposé, il y les véhicules hybrides non autonomes, pour lesquels le stockage est pré-chargé pour seconder voire suppléer le générateur d'énergie primaire, en tant que générateur de puissance, souvent pendant un temps court vis-à-vis de la mission de traction ; sa recharge se faisant en point fixe par un apport externe d'énergie. Le dimensionnement du générateur d'énergie et du système de stockage est très différent selon le cas. Pour ce qui nous concerne, nous considérons une hybridation autonome par stockage . Par conséquent, le bilan énergétique du dispositif de stockage, aux pertes près,

⁽¹⁾Il s'agit d'une locomotive pouvant fonctionner en autonomie avec un groupe Diesel ou connecté à la caténaire, ce qui augmente sa mobilité sur le réseau ferré.

doit toujours s'annuler⁽¹⁾.

Afin de bien poser et de traiter de façon rigoureuse le problème de la caractérisation et de la classification des missions, nous introduisons, dans la suite de cette section quelques notions mathématiques. Soit Ω_M l'univers (ou l'ensemble) des missions ferroviaires. Chaque mission m correspond à la donnée d'une durée $d \in \mathbb{R}^+$ et d'une fonction $P \in (\mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R})$ continue⁽²⁾ sur l'intervalle $[0, d]$ représentant la consommation de puissance en fonction du temps t pendant la mission m .

$$m \in \Omega_M \Rightarrow \exists d \in \mathbb{R}, \exists P \in (\mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}) \text{ tels que } \begin{cases} P \text{ continue sur } [0, d] \\ m : t \in [0, d_i] \xrightarrow{P} P(t) \end{cases} \quad (2.6)$$

Dans la suite de ce rapport, la représentation symbolique des missions varie selon le contexte. Lorsque nous invoquons plusieurs missions dans le même paragraphe, nous utilisons des indices entiers $m_i(d_i, P_i)$ pour les différencier. Par ailleurs, dans le souci de simplifier les expressions mathématiques, nous utilisons indifféremment les notations $m(d, P)$, $m(P)$ ou m pour symboliser les missions. Les segments de missions sont des sous-ensembles de Ω_M . Nous utilisons les notations Seg ou Seg_x où x est un élément de différenciation, pour représenter les segments de missions. La convention de signe utilisée dans tout ce rapport sera, sauf mention contraire explicite, la suivante (convention générateur) :

$$\begin{cases} P(t) \geq 0 & \text{consommation d'énergie ou décharge du stockage} \\ P(t) < 0 & \text{récupération d'énergie ou charge du stockage} \end{cases} \quad (2.7)$$

En l'état, le partitionnement des missions ferroviaires est établi selon des critères de puissance crête et de vitesse voire de masse embarquée (§2.1). Puissance crête et vitesse sont sans doute des indicateurs de première importance mais dans le contexte de l'hybridation, leur valeur informationnelle reste limitée. Ni la puissance crête, ni la vitesse prises séparément ou couplées ne peuvent être corrélées à l'allure de la puissance consommée à chaque instant d'une mission. Or, l'allure de la consommation de puissance a une importance capitale pour l'hybridation. Il faudra donc aller au-delà de ces indicateurs classiques pour appréhender la problématique de l'hybridation ferroviaire sur des bases saines. Nous proposons une approche particulière de la notion de mission, plus adaptée à la problématique de l'hybridation ferroviaire. Cette nouvelle approche consiste à doter l'univers des missions ferroviaires Ω_M de relations d'ordre⁽³⁾ permettant de comparer et de classer les missions dans le contexte de l'hybridation ferroviaire. En d'autres termes, nous proposons un jeu d'indicateurs permettant d'évaluer et de comparer les missions et les segments de missions.

La puissance crête P_{\max} et puissance moyenne P_{moy} d'une mission $M(d, P)$ sont deux indicateurs couramment utilisés pour le dimensionnement électrique et thermique de la

⁽¹⁾A la fin d'une mission, le stockage doit retrouver son état initial pour que la locomotive soit prête pour démarrer une autre mission. Par conséquent, la durée de la mission peut être prolongée, tant que la remise à niveau du stockage n'est pas terminée. Cet aspect de la notion de mission est discuté à la section 4.2.2 (page 115).

⁽²⁾La continuité de $P(t)$ garantit la possibilité de calculer son intégrale.

⁽³⁾Au sens de la théorie des ensembles

chaîne de production d'énergie embarquée sur une locomotive classique (électrique ou Diesel).

$$\begin{cases} P_{\max} = \max_{t \in [0, d]} (P(t)) \\ P_{\text{moy}} = \frac{1}{d} \int_0^d P(t) dt \end{cases} \quad (2.8)$$

Le problème de la caractérisation des missions peut être posé comme un problème de reconnaissance de formes. Sans nous perdre dans les méandres de la théorie de la reconnaissance de formes, nous empruntons succinctement quelques mots à cette théorie. En général, deux concepts sont utilisés pour décrire un objet. Il s'agit de la « taille » et de la « forme ». Nous proposons d'emblée les associations « taille/ P_{\max} » et « forme/allure de P ». Même si ces associations nous semblent triviales, elles ne sont proposées qu'à des fins d'illustration. Dans la suite de cette section, nous gardons l'analogie « taille/ P_{\max} ». Quant à l'analogie « forme/allure de P », nous proposons deux indicateurs de « forme » pour traduire l'allure ou la forme de la consommation de puissance. Nous allons introduire notamment le « potentiel d'hybridation de puissance » et le « potentiel d'hybridation énergétique », qui traduisent la facilité à hybrider une mission ou un segment de missions.

2.3.1 Potentiel d'hybridation de puissance

Le « potentiel d'hybridation de puissance » (PHP) traduit la réduction potentielle de la taille du générateur d'énergie primaire⁽¹⁾ que permettrait une hybridation par stockage. Généralement, l'hybridation par stockage vise à réduire la taille du générateur primaire, qu'il soit polluant (groupe Diesel) ou non (caténaire, groupe à biocarburant ou PAC), la finalité de la démarche étant de réduire la consommation et la pollution (du groupe Diesel ou du groupe à biocarburant), le coût (de la PAC par exemple), et l'encombrement. Le potentiel d'hybridation de puissance est un indicateur de « forme ». En ce sens, nous faisons abstraction de la « taille » (c'est-à-dire P_{\max}) de la mission. Ce qui rend possible la comparaison entre différents segments, selon le seul critère de leur capacité à tolérer l'hybridation de puissance. Nous formulons le potentiel d'hybridation de puissance de la façon suivante :

$$\text{PHP} = 1 - \frac{P_{\text{moy}}}{P_{\max}} \quad (2.9)$$

Afin d'éviter tout effet de bord lié aux valeurs singulières des variables P_{\max} et P_{moy} (par exemple $P_{\text{moy}} < 0$ ou $P_{\max} \leq 0$) nous consolidons la formulation du potentiel d'hybridation de puissance en la redéfinissant de la façon suivante :

$$\text{PHP} = \begin{cases} 1 - \frac{P_{\text{moy}}}{P_{\max}} & \text{si } P_{\text{moy}} \geq 0 \text{ et } P_{\max} > 0 \\ 1 & \text{sinon} \end{cases} \quad (2.10)$$

Cette définition implique que, quelle que soit la mission considérée, $\text{PHP} \in [0, 1]$. $\text{PHP} = 0$ caractérise une mission strictement défavorable à l'hybridation et $\text{PHP} = 1$ caractérise une mission fortement favorable à l'hybridation.

⁽¹⁾Dans le cadre du projet PLATHEE, il s'agit du groupe Diesel, la source polluante donc.

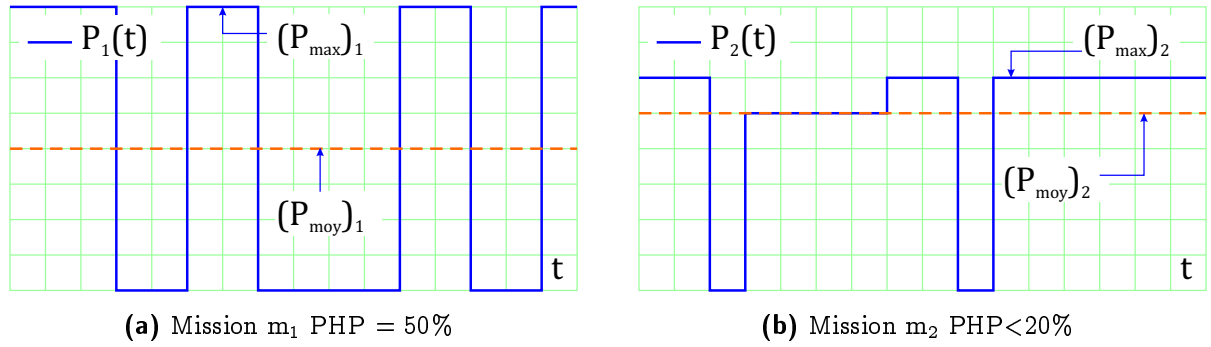


Fig. 2.2: Deux exemples de missions théoriques et les PHP associés (1)

Afin d'illustrer le sens physique de l'indicateur PHP, considérons les missions théoriques $m_1 : P_1(t)$ et $m_2 : P_2(t)$ de la figure 2.2. Remarquons que ces missions sont très différentes l'une de l'autre. $(P_{\max})_1 \neq (P_{\max})_2$ et $(P_{\text{moy}})_1 \neq (P_{\text{moy}})_2$. Intuitivement, il apparaît que la mission m_1 est plus "hybridable" que la mission m_2 . En effet, la moyenne de la mission m_2 est relativement plus proche de la puissance crête qu'elle ne l'est pour la mission m_1 . En d'autres termes, la source de puissance dimensionnée respectivement à $(P_{\max})_1$ pour la mission m_1 et à $(P_{\max})_2$ pour la mission m_2 fonctionnerait plus souvent à sa capacité limite dans le cas de la missions m_2 que dans le cas de la mission m_1 . Le calcul des potentiels d'hybridation confirme l'observation précédente ($\text{PHP}_1 > \text{PHP}_2$).

Malgré son caractère pertinent et même intuitif, le potentiel d'hybridation de puissance ne couvre pas l'ensemble des aspects de la « forme » des missions. Nous introduisons dans la section suivante un nouvel indicateur qui vient compléter le potentiel d'hybridation de puissance pour exprimer plus finement la « forme » des missions.

2.3.2 Potentiel d'hybridation énergétique

Le « potentiel d'hybridation énergétique » (PHE) est analogue sur le plan énergétique, au potentiel d'hybridation de puissance. Avant de montrer en quoi consiste cette nouvelle notion, nous allons d'abord montrer les limites du potentiel d'hybridation de puissance. Pour cela, considérons les deux missions théoriques de la figure 2.3. Ces deux missions ont la même « taille » et surtout le même PHP. Pourtant, elles sont très différentes l'une de l'autre. Intuitivement, nous pouvons noter qu'en comparaison à la mission m_1 (figure 2.3a), les multiples découpages de la mission m_2 (figure 2.3b) faciliteraient mieux l'hybridation de cette dernière.

Afin de mettre en évidence cette constatation, nous allons considérer l'aspect énergétique des missions. Rappelons que dans cette phase d'analyse des missions, la nature des systèmes de stockage pouvant servir pour l'hybridation n'est pas prise en compte. Nous faisons donc l'hypothèse que ce stockage d'énergie se fait dans des systèmes de stockage idéaux. Cette hypothèse est indispensable pour découpler l'analyse des missions des contraintes technologiques liées aux différents systèmes de stockage. Dans l'hypothèse où

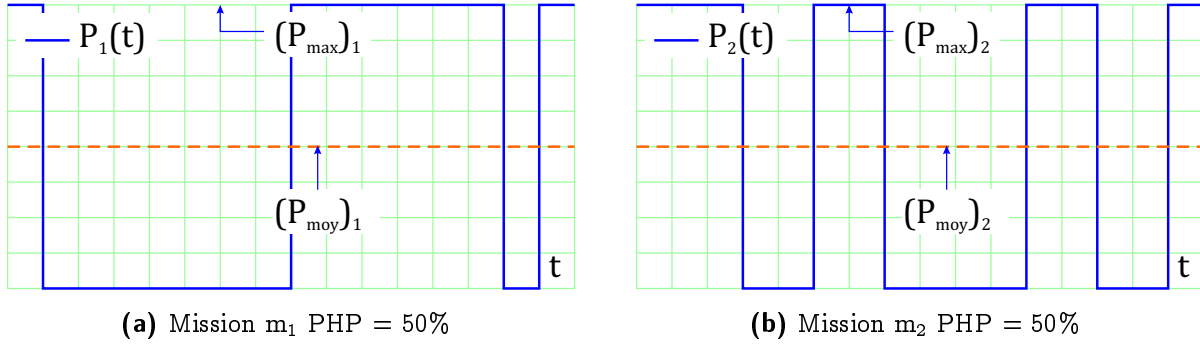


Fig. 2.3: Deux exemples de missions théoriques et les PHP associés (2)

le nouveau générateur d'énergie primaire fournit de façon constante la puissance moyenne de la mission, considérons l'évolution de l'énergie $E_s(t)$ dans le dispositif de stockage :

$$\forall t \in [0, d], E_s(t) = - \int_0^t (p(\tau) - P_{\text{moy}}) d\tau \quad (2.11)$$

Nous en déduisons l'énergie utile E_u que stockerait le dispositif de stockage pour assurer cette mission.

$$E_u = \max_{t \in [0, d]} (E_s(t)) - \min_{t \in [0, d]} (E_s(t)) \quad (2.12)$$

Par définition $E_u \geq 0$.

Remarque: En ayant défini l'énergie utile au stockage E_u et connaissant la puissance maximale de stockage $P_{\max}^{\text{stock}} = P_{\max} - P_{\text{moy}}$, on peut noter que l'enveloppe à laquelle doit répondre le dispositif de stockage se trouve parfaitement définie dans le plan de Ragone, comme le montre la figure 2.4. Nous verrons au chapitre 3 comment ces données sont utilisées pour dimensionner les éléments de stockage. L'objectif dans cette section est de formuler des indicateurs qui évaluent la facilité ou la difficulté potentielles à hybrider une mission donnée.

La figure 2.5 montre l'évolution de l'énergie stockée pour les deux exemple de missions considérées. Les résultats sont très intéressants. Nous obtenons pour deux missions identiques selon le critère de « taille » (P_{\max}) et le critère de « forme » (PHP), deux valeurs

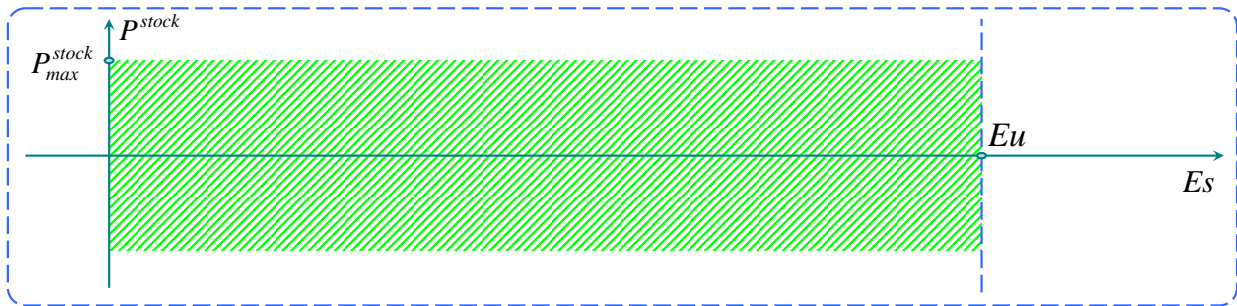


Fig. 2.4: Situation du dispositif de stockage dans le plan de Ragone

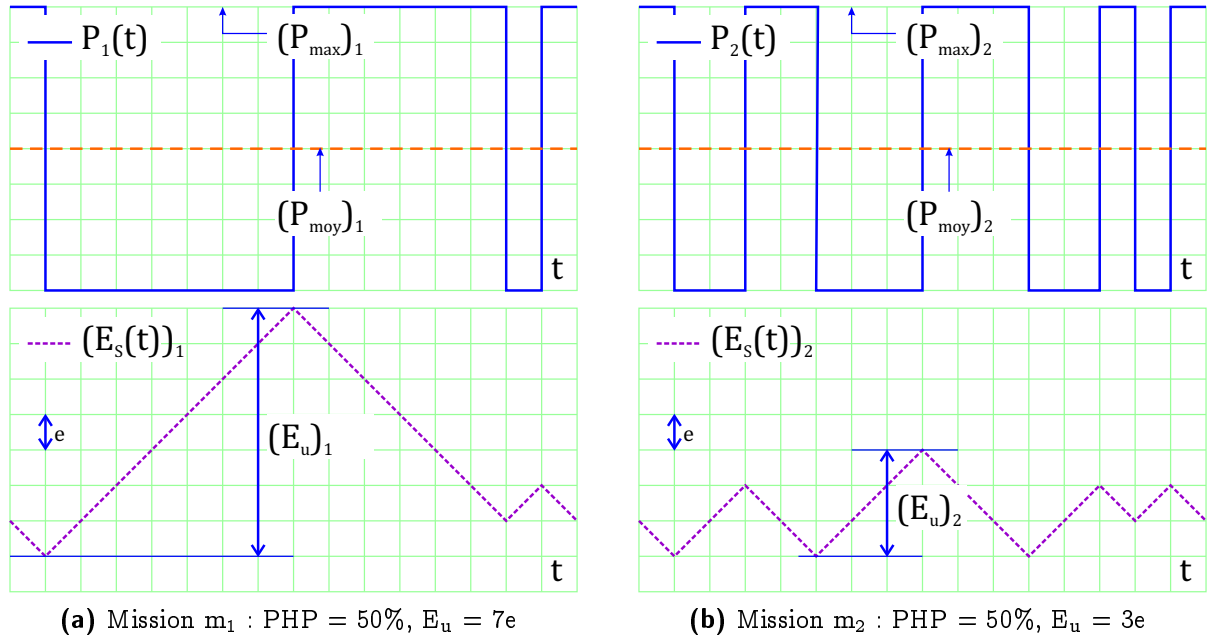


Fig. 2.5: Deux exemples de missions théoriques différenciées par leur E_u

différentes de l'énergie utile à stocker. La mission m_1 (figure 2.5a) nécessite un plus grand volume de stockage que la mission m_2 (figure 2.5b). En fait, c'est la fréquence et la régularité des cycles⁽¹⁾ de la mission m_2 qui justifient sa faible énergie utile à stocker.

Ainsi, la fréquence et la régularité des cycles d'une mission peuvent être corrélées avec l'énergie utile à stocker c'est-à-dire le besoin en élément de stockage pour assurer cette mission. D'où l'idée de formuler le « potentiel d'hybridation énergétique » PHE de façon à illustrer ces deux notions de fréquence et de régularité⁽²⁾. Pour cela, nous assimilons le « potentiel d'hybridation énergétique » à une fréquence fictive définie par :

$$\text{PHE} = \begin{cases} \frac{P_{\max}}{E_u} & \text{si } E_u \neq 0 \text{ et } P_{\max} \geq 0 \\ +\infty & \text{sinon} \end{cases} \quad (2.13)$$

Cette définition implique que quelle que soit la mission considérée $\text{PHE} \in [0, +\infty[$.

Le choix de la formulation $\text{PHE} = P_{\max}/E_u$ mérite une explication. En effet, le PHE tel que nous l'entendons est un indicateur de forme illustrant la fréquence et la régularité des intermittences de la mission. Or cette information se trouve dans l'énergie utile E_u . Plusieurs formulations sont possibles mais le rapport P_{\max}/E_u est le seul qui respecte l'esprit de l'indicateur PHE.

♦ $\text{PHE} = E_u$: Dans ce cas, l'information utile est conservée mais elle est implicitement masquée par la taille de la mission. En effet, il existe fatalement une corrélation entre la taille de la mission P_{\max} et l'énergie utile E_u : par exemple l'énergie utile extraite d'une

⁽¹⁾Nous entendons par cycles, les découpages de la mission. Sur une locomotive hybride ces découpages correspondent à des phases de charge et de décharge du dispositif de stockage.

⁽²⁾Nous pouvons aussi parler de la notion d'intermittence.

mission TGV (dont le niveau de puissance de l'ordre de 10 MW) n'est en rien comparable à celle extraite d'une mission triage (dont le niveau de puissance de l'ordre de 600 kW). Généralement, et c'est tout à fait normal, plus on monte en puissance, plus grande est l'énergie utile. Or l'indicateur PHE doit être dissocié de toute considération liée à la taille de la mission et doit évaluer uniquement la facilité ou la difficulté "relative" à hybrider une mission. Pour ces mêmes raisons la formulation $PHE = 1/Eu$ est aussi inappropriée. De plus, cette dernière formulation n'est l'équivalence d'aucune grandeur physique.

◆ Pour respecter le caractère fréquentiel de l'indicateur PHE, la formulation la plus juste est de la forme $PHE = \text{puissance}/\text{énergie}(Eu)$ car, d'une part, elle permet d'exploiter l'information utile contenue dans Eu et d'autre part, elle est l'équivalence d'une fréquence. Reste à choisir la bonne puissance au numérateur. Trois variables sont possibles : P_{\max} , P_{moy} ou $P_{\max}^{\text{stock}} = P_{\max} - P_{\text{moy}}$. Nous éliminons P_{\max}^{stock} car le rapport $P_{\max}^{\text{stock}}/Eu$ caractérise la nature du dispositif de stockage et non l'allure (la forme) intrinsèque de la mission⁽¹⁾. Notre choix s'est porté sur la formulation $PHE = P_{\max}/Eu$ car ainsi, nous réduisons l'effet de la corrélation entre P_{\max} et Eu sur le PHE.

Il est important de bien appréhender les notions de fréquence et de régularité des cycles, pour mieux cerner l'intérêt de l'indicateur PHE. Pour illustrer ces deux notions, considérons les missions de la figure 2.6. Il s'agit de quatre missions théoriques identiques au sens des indicateurs P_{\max} et PHP. La comparaison des missions m_1 et m_2 montre l'importance de la fréquence des cycles. En effet, en multipliant par 2 la fréquence des cycles sans changer ni le P_{\max} , ni le PHP, nous passons de $PHE_1 = P_{\max}/8e$ à $PHE_2 = P_{\max}/4e$. Notons par ailleurs que ces deux missions sont parfaitement régulières.

La comparaison des missions m_3 et m_4 montre l'importance de la régularité des cycles. En effet, la mission m_3 est composée d'un mélange de cycles de fréquence irrégulière. La régularité des cycles dans le cas de la mission m_4 justifie son fort potentiel d'hybridation énergétique : $PHE_4 > PHE_3$.

Nous venons ainsi d'expliquer le sens des notions de fréquence et de régularité des cycles et de montrer que ces deux notions sont distinctes et complémentaires.

2.3.3 Valeur informationnelle du triplet (P_{\max} , PHP, PHE)

Nous venons d'introduire le triplet (P_{\max} , PHP, PHE) comme indicateur à valeur informationnelle suffisamment complète pour caractériser une mission d'hybridation ferroviaire sur le plan de la puissance et de l'énergie. Il est facile de montrer que ce triplet conserve la plupart des informations nécessaires au dimensionnement énergétique (source de puissance et stockage) d'une locomotive hybride. Il s'agit de la puissance maximale P_{\max} (trivial), de la puissance moyenne P_{moy} dimensionnant la source d'énergie primaire et l'énergie utile au

⁽¹⁾Il y a néanmoins un lien entre la forme de la mission et la nature du dispositif de stockage. Cette problématique est d'ailleurs traitée à la section 3.3.3 (page 63).

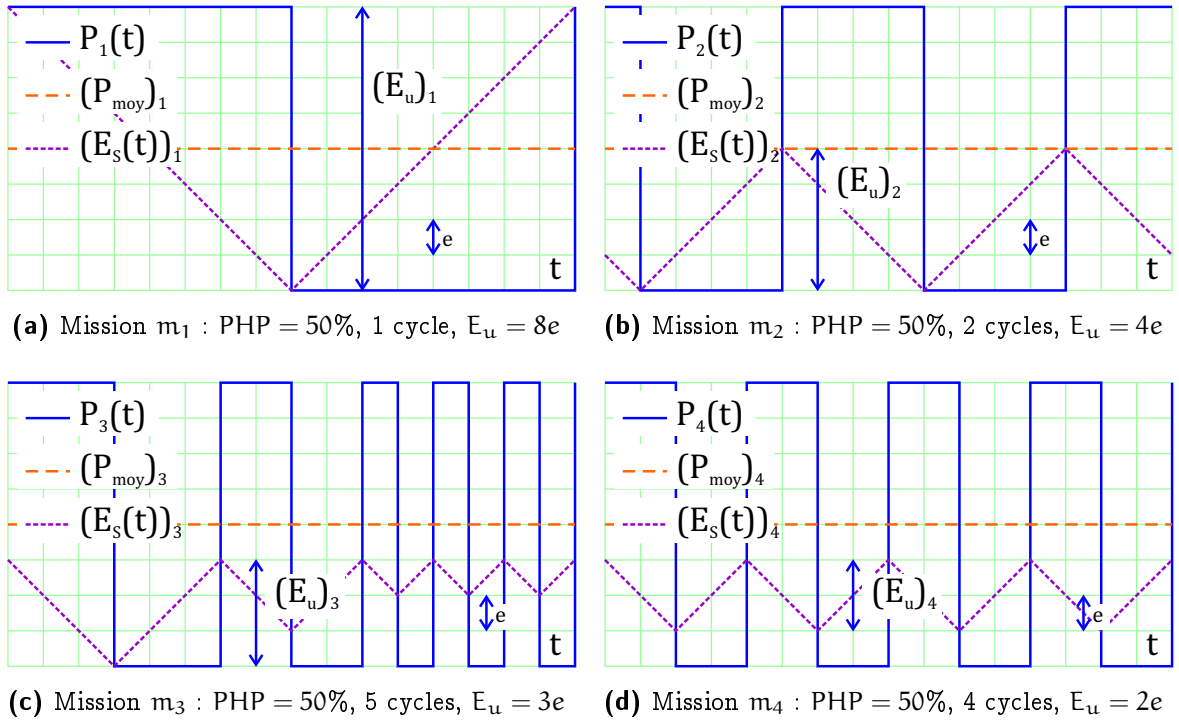


Fig. 2.6: Mise en évidence des notions de fréquence et de régularité des cycles

stockage E_u dimensionnant le dispositif de stockage. Selon les équations Eq.2.10, Eq.2.13 et à l'exception des cas extrêmes⁽¹⁾, il vient :

$$(P_{\max}, P_{\text{moy}}, E_u) \Leftrightarrow (P_{\max}, \text{PHP}, \text{PHE}) \quad (2.14)$$

L'implication aller (\Rightarrow) signifiant qu'il est possible de calculer le triplet $(P_{\max}, \text{PHP}, \text{PHE})$ à partir du triplet $(P_{\max}, P_{\text{moy}}, E_u)$, est une conséquence immédiate des équations Eq.2.10 et Eq.2.13. Dans l'hypothèse d'une mission conventionnelle (à l'exclusion des cas extrêmes), l'implication retour (\Leftarrow) de la proposition Eq.2.14 se justifie par :

$$\begin{cases} P_{\text{moy}} &= (1 - \text{PHP}) \cdot P_{\max} \\ E_u &= \frac{P_{\max}}{\text{PHE}} \end{cases} \quad (2.15)$$

Une fois l'équivalence entre les nouveaux indicateurs et les indicateurs existant démontrée, la justification de la nécessité de ces nouveaux indicateurs devient impérative. En effet, si nous revenons au vocabulaire de la reconnaissance de formes, les notions de « forme » (ou d'« allure ») et de « taille » indispensables à la caractérisation des missions sont tellement enchevêtrées que le système classique d'indicateurs $(P_{\max}, P_{\text{moy}}, E_u)$ ne permet pas de les dissocier et d'établir des comparaisons entre missions ou segments de missions. L'intérêt du nouveau système $(P_{\max}, \text{PHP}, \text{PHE})$ est qu'il exprime de façon découplée l'indicateur de « taille » P_{\max} et les indicateurs de « forme » PHP et PHE comme le montre la figure 2.7. Ce découplage des notions de « taille » et de « forme » est plus favorable à la caractérisation et à la classification des missions.

⁽¹⁾ Les cas extrêmes sont $P_{\max} \leq 0$ ou $P_{\text{moy}} < 0$ ou $E_u \leq 0$ (simple précaution mathématique)

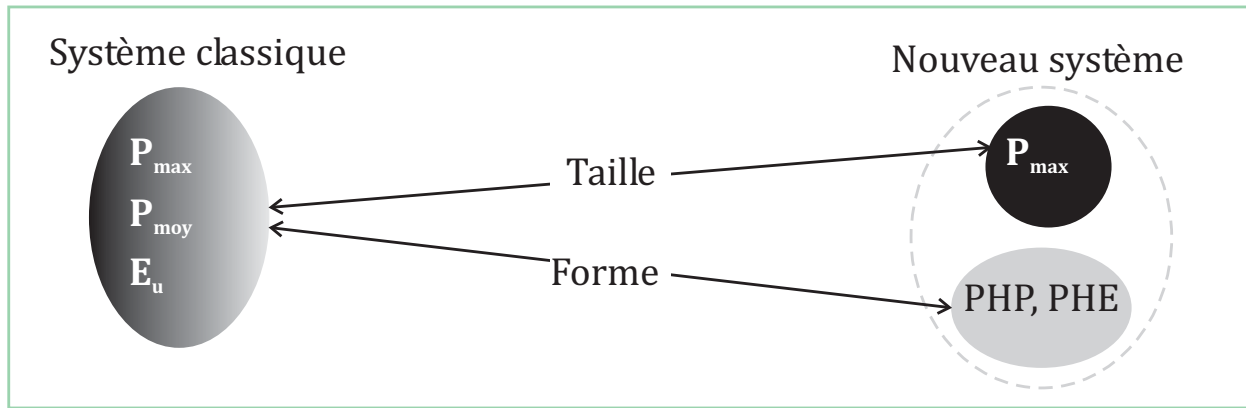


Fig. 2.7: Dissociation de la taille de la forme des missions ferroviaires

2.4 Application aux missions ferroviaires

2.4.1 Missions dominantes ou dimensionnantes

Dans le cadre du projet PLATHEE, nous disposons d'une base de données de missions ferroviaires contenant plusieurs missions de triage, de desserte locale et une mission de transport urbain en omnibus. Ces missions, enregistrées sur des engins dans les conditions réelles d'exploitation, comportent une grande disparité entre elles, même au sein d'un segment. Cette disparité s'explique par le fait qu'en exploitation réelle les missions varient selon la charge, la vitesse ou le profil de ligne. Cette profusion de missions permet de couvrir toutes les performances attendues des futurs trains hybrides devant assurer ces missions. Mais elle constitue aussi une difficulté majeure, dans le sens où ces performances attendues sont disséminées à travers ces missions. L'analyse des missions doit permettre d'extraire ces caractéristiques dimensionnantes dans le but d'identifier ou de synthétiser une mission dimensionnante. Nous allons établir le processus de tri qui permet d'identifier, dans un ensemble de missions appartenant à un même segment, la ou les missions dominantes. Nous allons pour cela remanier légèrement la définition des indicateurs PHP et PHE pour les adapter à cette utilisation particulière.

Une première analyse de la base de données des missions est donnée dans le tableau 2.2⁽¹⁾. Il est difficile voire impossible d'identifier, sur la base des puissances maximale et moyenne, laquelle ou lesquelles des missions dominant l'ensemble des missions de leur segment. Considérons par exemple le segment de triages. Nous pourrions la mission m_3 pour sa puissance crête élevée, ou bien la mission m_1 pour sa moyenne élevée ou même ces deux missions comme les missions dominantes du segment de triages. Mais, si on s'y penche de plus près, la mission m_2 présente des caractéristiques voisines à la fois de celles de m_1 et de m_3 et pourrait présenter une difficulté plus élevée que celle des deux premières missions prises séparément. Nous avons là un excellent exemple de la difficulté d'identification des missions dominantes.

⁽¹⁾L'ensemble des missions étudiées dans ce rapport est représenté à l'annexe A

Les définitions des indicateurs de potentiel d'hybridation de puissance et de potentiel d'hybridation énergétique (Eq.2.10 et Eq.2.13) prennent la mission de façon isolée et ne tiennent donc pas compte de l'"effet de contexte". Or, si une mission fait partie d'un segment pour lequel nous concevons une locomotive hybride, la puissance crête de la locomotive peut être imposée par n'importe laquelle des missions du segment considéré. C'est ce que nous appelons l'"effet de contexte". Pour formaliser cette relation entre une mission et son segment d'appartenance, nous introduisons la notion de « contexte » dans l'évaluation des missions. Le « potentiel d'hybridation contextuel de puissance » (PHPc) et le « potentiel d'hybridation énergétique contextuel » (PHEc) évaluent alors la mission en tenant compte du fait que la puissance crête imposée à la locomotive hybride à concevoir n'est pas forcément imposée par la mission considérée mais plutôt par n'importe laquelle des missions de l'ensemble considéré.

Soit une mission ferroviaire m appartenant à un segment Seg pour lequel la locomotive hybride à dimensionner est destinée, nous formulons les indicateurs contextuels de la façon suivante :

$$PHPc(m, Seg) = \begin{cases} 1 - \frac{P_{moy}(m)}{P_{max}(Seg)} & \text{si } P_{moy}(m) \geq 0 \text{ et } P_{max}(Seg) > 0 \\ 1 & \text{sinon} \end{cases} \quad (2.16)$$

$$PHEc(m, Seg) = \begin{cases} \frac{P_{max}(Seg)}{E_u(m, Seg)} & \text{si } E_u(m, Seg) \neq 0 \text{ et } P_{max}(Seg) \geq 0 \\ +\infty & \text{sinon} \end{cases} \quad (2.17)$$

Quelques termes de ces équations méritent une explication. Le terme $P_{max}(Seg)$ représente la puissance maximale sur l'ensemble du segment Seg , c'est-à-dire celle de la mission du segment ayant la plus grande puissance crête. En d'autres termes :

$$\forall m \in Seg, P_{max}(Seg) \geq P_{max}(m) \text{ et } \exists m \in Seg, P_{max}(Seg) = P_{max}(m) \quad (2.18)$$

Le terme $E_u(m, Seg)$ définit l'énergie utile contextuelle. Ce terme mérite une explication approfondie. En effet, la formulation de l'énergie utile est faite par les équations Eq.2.11 et Eq.2.12, avec l'hypothèse que dans l'architecture hybride, le générateur d'énergie primaire complétant le dispositif de stockage, fournit en permanence la puissance moyenne de la mission. Cette hypothèse est vraie si ce générateur est dimensionné pour une et une seule mission. Dans le cas d'un segment où les missions présentent des puissances moyennes variées, nous faisons désormais l'hypothèse que ce générateur est dimensionné à la plus grande puissance moyenne. Cette nouvelle hypothèse transforme les équations Eq.2.11 et Eq.2.12 de la façon suivante :

$$\forall t \in [0, d], E_s(m, Seg, t) = - \int_{sat}^t (p(\tau) - P_{moy}(Seg)) d\tau \quad (2.19)$$

$$E_u(m, Seg) = \max_{t \in [0, d]} (E_s(m, Seg, t)) - \min_{t \in [0, d]} (E_s(m, Seg, t)) \quad (2.20)$$

Tab. 2.2: Base de données des missions enregistrées dans le cadre du projet PLATHEE

Mission		Caractérisation				
Segment de mission	Identifiant	d	V_{\max}	V_{moy}	P_{\max}	P_{moy}
		(min)	(km/h)	(km/h)	(kW)	(kW)
Triages	m_1	14	7	3	237	81
	m_2	27	15	5	463	80
	m_3	26	18	4	477	74
	m_4	8	20	5	303	57
	m_5	11	18	4	419	48
	m_6	38	25	6	444	29
	m_7	47	21	5	212	14
Dessertes locales	m_8	46	48	23	558	200
	m_9	9	31	13	546	167
	m_{10}	23	42	21	545	147
	m_{11}	380	85	26	564	125
	m_{12}	16	30	12	554	109
	m_{13}	39	79	29	550	95
	m_{14}	13	19	10	466	88
	m_{15}	24	49	25	492	56
Transport urbain : TER2N	m_{16}	48	110	60	957	89

La définition de $P_{\text{moy}}(\text{Seg})$ est analogue à celle de $P_{\max}(\text{Seg})$ (Eq.2.18)

$$\forall m \in \text{Seg}, P_{\text{moy}}(\text{Seg}) \geq P_{\text{moy}}(m) \text{ et } \exists m \in \text{Seg}, P_{\text{moy}}(\text{Seg}) = P_{\text{moy}}(m) \quad (2.21)$$

L'opérateur \int_{sat} est une intégration saturée. Son algorithme est présenté en annexe, à la section B.1(page 217).

Reprenons le tableau des missions de la base de données de PLATHEE en ajoutant deux colonnes pour les indicateurs contextuels (tableau 2.3). Il tombe sous le sens que les missions dominantes sont celles qui sont les moins favorables à l'hybridation, c'est-à-dire celles qui présentent un faible potentiel d'hybridation contextuel de puissance et un faible potentiel d'hybridation énergétique contextuel. Étant donné que les missions d'un segment sont caractérisées dans le même contexte P_{\max} , il n'est plus indispensable de les discriminer avec l'indicateur P_{\max} . La comparaison des missions peut alors se faire dans le plan (PHPc, PHEc). La figure 2.8 montre le tri des missions de triage dans le plan (PHPc,

Tab. 2.3: Caractérisation des missions ferroviaires

Mission		Caractérisation					
Segment de mission	Identifiant	V_{\max}	V_{moy}	P_{\max}	P_{moy}	PHP _c	PHE _c
		(km/h)	(km/h)	(kW)	(kW)	(%)	(mHz)
Triages	m ₁	7	3	237	81	83	139.3
	m ₂	15	5	463	80	83	35.0
	m ₃	18	4	477	74	84	45.7
	m ₄	20	5	303	57	88	401.2
	m ₅	18	4	419	48	90	277.3
	m ₆	25	6	444	29	94	181.6
	m ₇	21	5	212	14	97	349.0
Dessertes locales	m ₈	48	23	558	200	65	4.5
	m ₉	31	13	546	167	70	143.2
	m ₁₀	42	21	545	147	74	37.3
	m ₁₁	85	26	564	125	78	0.2
	m ₁₂	30	12	554	109	81	126.7
	m ₁₃	79	29	550	95	83	12.1
	m ₁₄	19	10	466	88	84	344.7
	m ₁₅	49	25	492	56	90	362.5

PHE_c). Notons que la mission m₂ domine l'ensemble des autres missions de triage. La même analyse permet d'identifier les missions de desserte locale m₈ et m₁₁ comme les missions dominantes du segment de dessertes locales (figure 2.9).

Notons, pour conclure sur le tri des missions, que le nombre de missions dimensionnantes (ou dominantes) ne peut excéder 2 voire 3 si la mission imposant le contexte (P_{\max}) ne domine pas dans le plan (PHP_c, PHE_c)⁽¹⁾. Le tri des missions a donc un intérêt direct dans le processus de conception car il nous évite de nous encombrer de missions dominées n'ayant aucun effet sur le dimensionnement *énergétique* de la locomotive hybride. Nous insistons volontairement sur le terme "*énergétique*", car les indicateurs que nous proposons dans ce rapport présentent quelques insuffisances sur l'aspect "dynamique" des missions. Nous évoquons cet aspect dans la section 2.5.

⁽¹⁾La mission qui présente la puissance crête la plus élevée doit être aussi dominante et doit être ajoutée à la liste des missions dominantes si elle n'y figure pas par ailleurs.

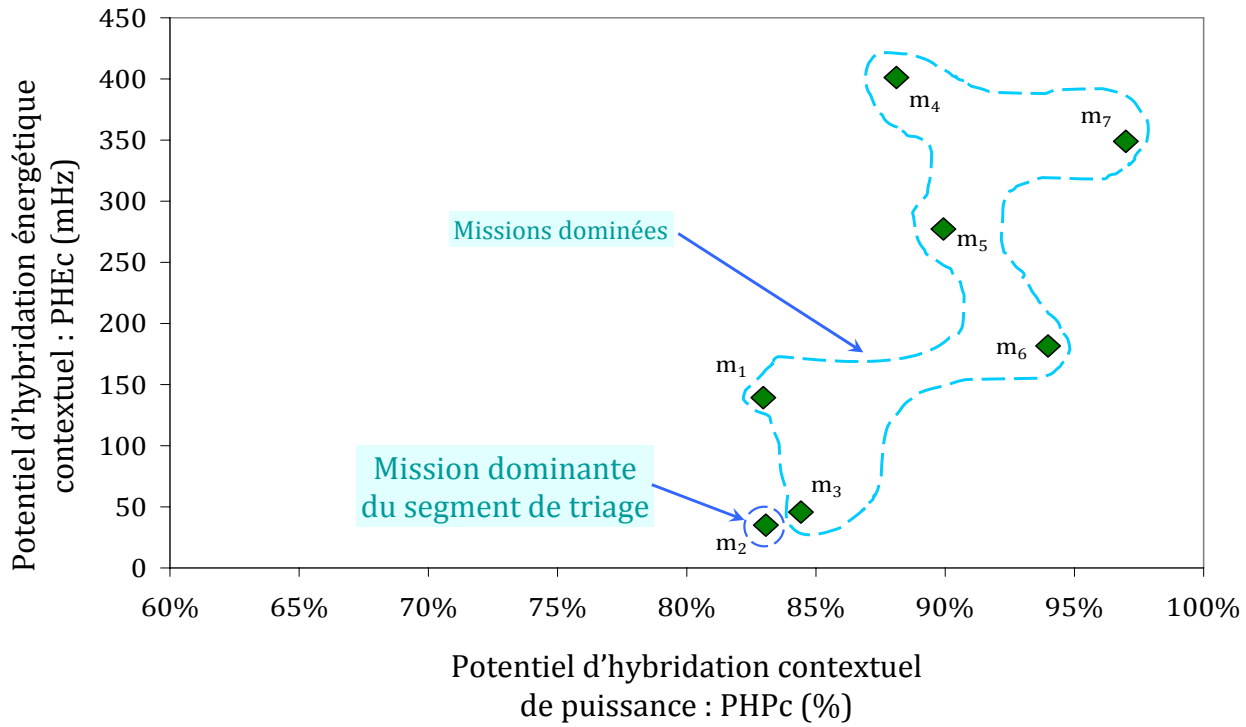


Fig. 2.8: Comparaison des missions de triage

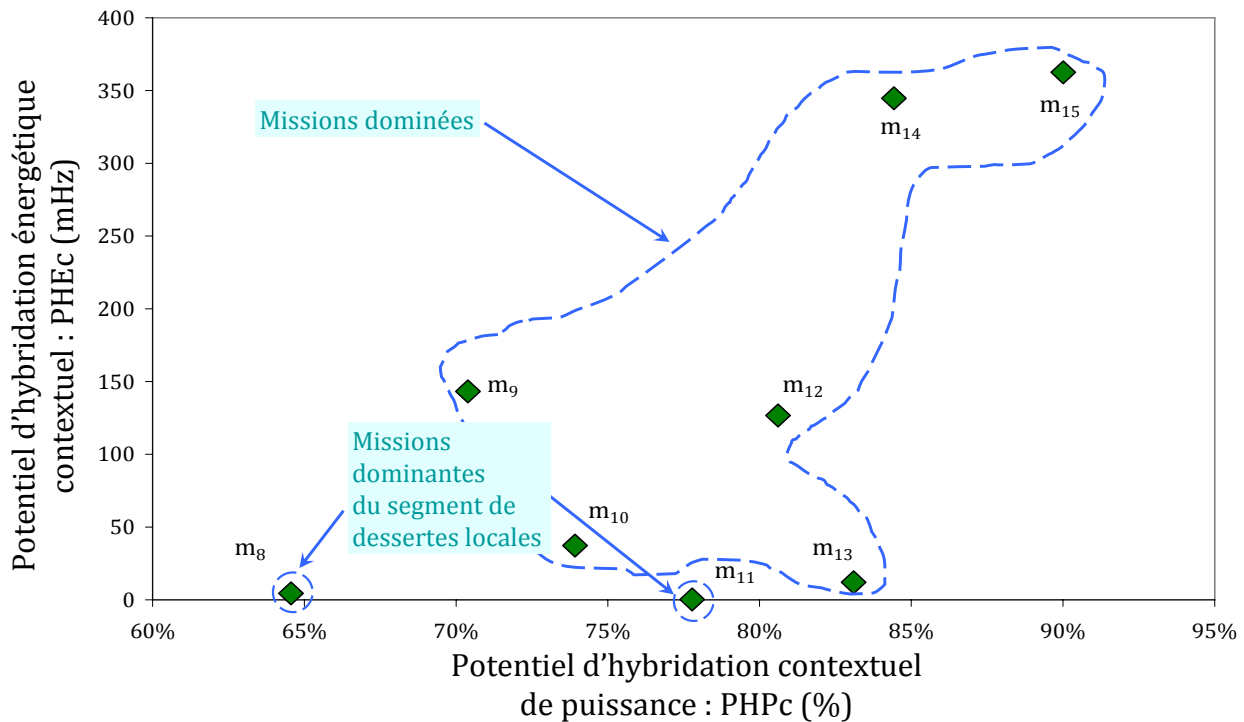


Fig. 2.9: Comparaison des missions de desserte locale

Lorsque l'ensemble des indicateurs désigne une unique mission comme la mission dominante d'un segment, nous pouvons parler de dominance totale. La mission concernée est alors seule capable de couvrir le dimensionnement énergétique de la locomotive pour le segment concerné. Dans le cas contraire, ce qui est le plus fréquent, nous retenons pour

le moment qu'il convient de conserver l'ensemble des missions dominantes tout le long du processus de conception, ce qui peut compliquer les phases de synthèse, d'analyse ou d'optimisation. Nous évoquerons dans les perspectives (§2.5) une approche par "fusion-réduction" des missions dominantes qui pourrait permettre de synthétiser une unique mission dimensionnante.

2.4.2 Caractérisation des segments de missions

Dans la section précédente, nous avons proposé des outils (indicateurs) de discrimination des missions au sein d'un même segment. Ces outils permettent d'alléger les segments de missions, qui ne comptent désormais que les missions les plus critiques⁽¹⁾. Ces indicateurs nous permettent d'aller encore plus loin dans cette nouvelle approche des missions. En effet, les indicateurs (P_{\max} , PHP, PHE) permettent de caractériser les segments de missions entre eux. La caractérisation des segments de missions ferroviaires est intéressante à double fin : d'une part, elle permet d'établir une classification des segments selon leur disponibilité à l'hybridation et d'autre part, elle permet d'évaluer en coût et en volume, la faisabilité de l'hybridation ferroviaire pour un segment donné.

Jusqu'ici, nous avons défini les potentiels d'hybridation pour la mission, puis pour la mission dans son contexte. Nous proposons dans cette section, une extension de la définition des potentiels d'hybridation, à un segment (ou un ensemble) de missions.

$$\text{Seg} = \{m_1, m_2, \dots, m_n\}$$

$$\text{PHP}(\text{Seg}) = \begin{cases} 1 - \frac{P_{\text{moy}}(\text{Seg})}{P_{\text{max}}(\text{Seg})} & \text{si } P_{\text{moy}}(\text{Seg}) \geq 0 \text{ et } P_{\text{max}}(\text{Seg}) > 0 \\ 1 & \text{sinon} \end{cases} \quad (2.22)$$

$$\text{PHE}(\text{Seg}) = \begin{cases} \frac{P_{\text{max}}(\text{Seg})}{E_u(\text{Seg})} & \text{si } E_u(\text{Seg}) \neq 0 \text{ et } P_{\text{max}}(\text{Seg}) \geq 0 \\ +\infty & \text{sinon} \end{cases} \quad (2.23)$$

La plupart des termes utilisés dans ces équations sont déjà définis plus haut (Eq.2.18, Eq.2.20 et Eq.2.21), à l'exception du terme $E_u(\text{Seg})$ que nous définissons à partir de Eq.2.20, comme suit :

$$\forall m \in \text{Seg}, E_u(\text{Seg}) \geq E_u(m, \text{Seg}) \text{ et } \exists m \in \text{Seg}, E_u(\text{Seg}) = E_u(m, \text{Seg}) \quad (2.24)$$

La base de données des missions du projet PLATHEE est partitionnée en trois segments : segment de triages (Seg_{tr}), segment de dessertes locales (Seg_{dl}) et segment de transports urbains en omnibus (Seg_{ob}). Le tableau 2.4 affiche les résultats de la caractérisation des segments de missions. Les critères de segmentation classiques apparaissent clairement dans

ce tableau. Triages et dessertes locales nécessitent des puissances crêtes relativement faibles (< 600 kW) alors que le transport urbain en omnibus admet une consommation maximale voisine du mégawatt. Du côté des vitesses, les triages sont caractérisés par des vitesses faibles ($V_{\text{moy}} \approx 6$ km/h et $V_{\text{max}} \leq 25$ km/h), les dessertes locales se font à des vitesses moyennement élevées ($V_{\text{moy}} \approx 29$ km/h et $V_{\text{max}} \leq 85$ km/h) et l'omnibus à des vitesses plus importantes ($V_{\text{moy}} \approx 60$ km/h et $V_{\text{max}} \leq 110$ km/h). Nous retrouvons ainsi la caractérisation classique des segments de missions ferroviaires.

Revenons à la caractérisation des segments de missions dans le plan (PHP,PHE). La figure 2.10 montre que, sur le plan de l'allure des missions, les missions de triage et transport urbain sont plus favorables à l'hybridation (fort PHP et fort PHE) que ne l'est le segment de dessertes locales. Remarquons, encore une fois, l'intérêt du découplage en la forme et la taille : les segments comparés à la figure 2.10 sont différents de taille et pourtant il est possible d'établir des comparaisons basées uniquement sur la « forme » entre eux.

De tout ce qui précède, nous pouvons conclure que l'analyse des missions et des segments, sur la base de nos nouveaux indicateurs, apporte des informations pertinentes sur la faisabilité de l'hybridation ferroviaire.

2.4.3 Application au démonstrateur LHyDIE

Le démonstrateur LHyDIE est destiné aux quinze missions de triage et de desserte locale (cf. annexe A). Sur le plan énergétique, le segment de dessertes locales domine celui des triages⁽¹⁾ (cf. §2.4.2). Donc, les dessertes les plus sévères m_8 et m_{11} représentées à la figure 2.11 sont celles qui démissionnent LHyDIE. Nous prouvons à la section 3.6.6 que, sur le plan énergétique pur – dimensionnement du groupe Diesel et des batteries –, ces deux missions (en particulier la mission m_{11}) imposent le dimensionnement de LHyDIE. Nous avons ainsi limité nos simulations de synthèse et d'analyse énergétiques de LHyDIE, à ces deux missions. Le processus de conception se trouve ainsi simplifié et accéléré.

Tab. 2.4: Caractérisation des segments de missions

Segment de missions	Caractérisation					
	V_{max}	V_{moy}	P_{max}	P_{moy}	PHP(Seg)	PHE(Seg)
	(km/h)	(km/h)	(kW)	(kW)	(%)	(mHz)
Triages (Seg _{tr})	25	6	477	81	83	35.0
Dessertes locales (Seg _{dl})	85	29	564	200	65	0.2
Transport urbain (Seg _{ob})	110	60	957	89	91	21.8

⁽¹⁾Critiques au sens de la puissance et de l'énergie

⁽¹⁾Autrement dit, les triages sont plus faciles à hybrider que les dessertes locales

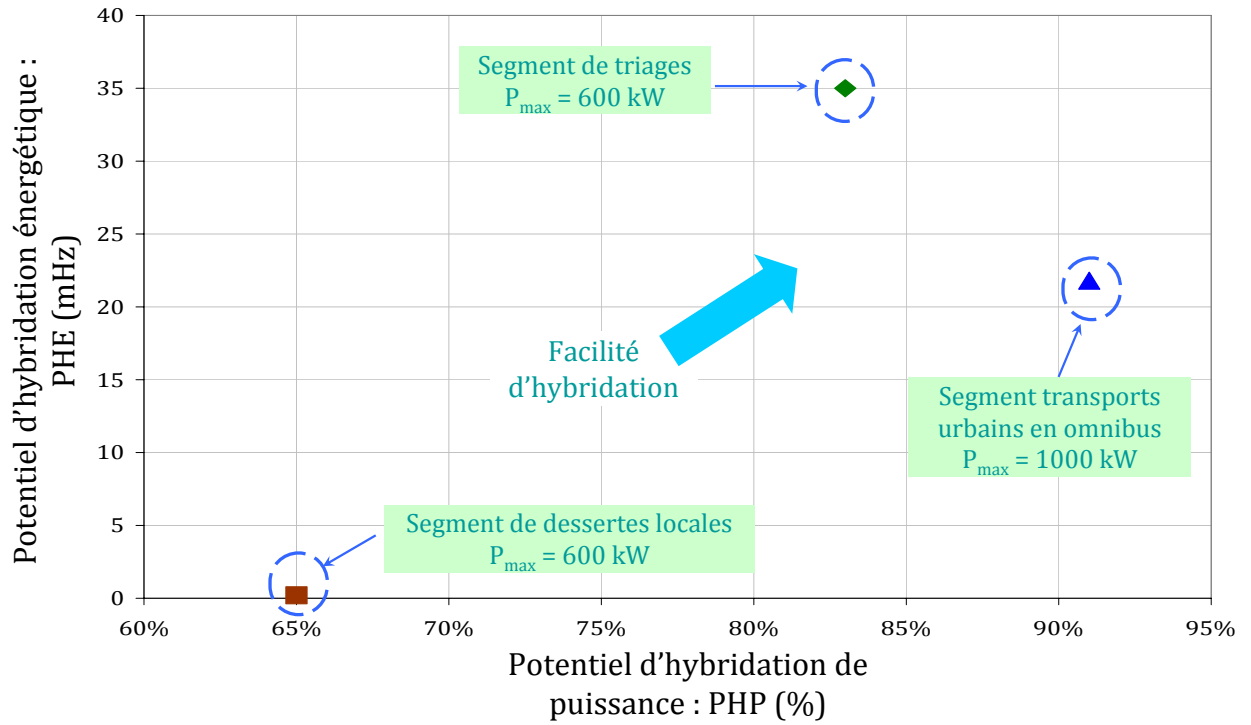


Fig. 2.10: Caractérisation des segments de mission dans le plan (P_{\max} , PHP)

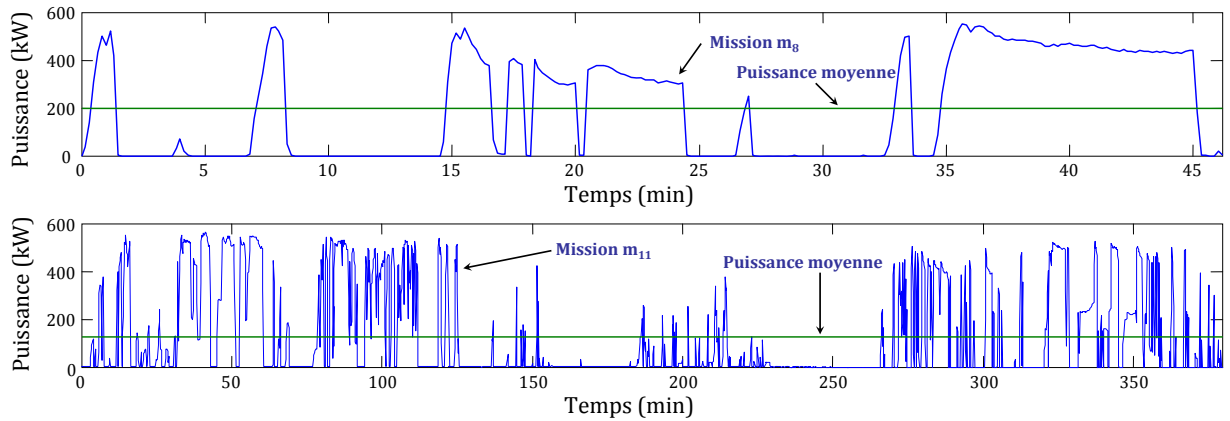


Fig. 2.11: Les deux dessertes locales dimensionnantes

2.5 Conclusion et perspectives

Dans ce chapitre, nous avons présenté une nouvelle approche de la notion de mission. Nous avons notamment proposé un jeu d'indicateurs qui permettent de caractériser et de classer les missions et les segments de missions. L'application de cette approche aux missions ferroviaires, en particulier au cas du démonstrateur LHyDIE, nous a permis d'identifier parmi les 15 missions de son cahier des charges, des missions dominantes qui nous ont servi pour sa conception.

Cependant, cette approche reste partielle et ne couvre pas l'aspect "dynamique" des missions, qui peut influencer le dimensionnement thermique des convertisseurs et des sys-

tèmes de refroidissement. En ne prenant en compte que les valeurs crêtes de la puissance, sans tenir compte de la durée de stagnation à cette valeur, cette approche peut ignorer des missions énergétiquement faciles, de puissance crête légèrement inférieure à celle du contexte, mais ayant une stagnation très longue sur leur puissance crête, donc thermiquement dimensionnantes. Néanmoins, ce risque est quasiment inexistant en ferroviaire où les dynamiques sont assez faibles et couvrent implicitement les constantes temps thermiques (quelle que soit la mission, la durée de stagnation à la puissance crête est assez élevée pour que l'effet de la dynamique soit négligé.)

L'un des aspects de notre approche qui nécessite une étude plus poussée est la synthèse d'une unique mission dimensionnante. En effet, dans le cas où plusieurs missions ressortent du tri, dans un segment, par rapport aux critères de potentiels d'hybridation contextuels et à la puissance crête (P_{\max} , PHP, PHE), nous avons proposé de garder l'ensemble des missions dominantes pour la conception de la locomotive hybride. Cependant, la question se pose de savoir synthétiser une mission unique dimensionnante pouvant servir au dimensionnement d'une locomotive hybride pour un segment donné. La solution est-elle de concaténer "bestialement" les missions dominantes ? Ne pourrait-on pas localiser les intervalles de temps dans lesquels les critères sont minimaux et les fusionner ensemble ? Il y a aussi l'idée d'extraire une mission multi segment dimensionnante, PGCD intelligent de l'ensemble des missions à couvrir. Ces processus de "fusion-réduction" et d'extraction d'une mission multi segment seraient primordiaux dans le contexte systémique, en particulier pour des approches d'optimisation.

Chapitre 3

Conception systémique séquentielle d'une locomotive hybride : synthèse

Ce chapitre présente la synthèse du dimensionnement et de la gestion énergétique d'une locomotive hybride. A l'aide de modèles de synthèse en flux de puissance, nous montrons qu'il est possible, à partir des missions de puissance, de procéder au dimensionnement énergétique⁽¹⁾ d'une locomotive hybride, sans rentrer dans la complexité des considérations électriques (disposition série ou parallèle des cellules de stockage, choix de la tension du bus DC, structure des hacheurs de stockage, ...) [11, 27]. Cette phase préliminaire de synthèse est une étape essentielle de la conception systémique séquentielle. Elle nous a permis de balayer l'univers des configurations susceptibles de répondre aux missions du cahier de charges. Elle est complétée par une phase d'analyse (chapitre 4), qui vient évaluer chacune de ces configurations à la lumière de critères tels que la consommation, la durée de vie, le coût système et de contraintes telles que l'encombrement et la dégradation temporelle⁽²⁾ des missions. Les techniques développées dans ce chapitre sont directement appliquées au cas particulier du démonstrateur LHyDIE, objet de cette étude.

Ce chapitre est réparti en plusieurs sections. Dans la section §3.1, nous introduisons la notion de conception séquentielle. Nous proposons notamment une modification de la structure traditionnelle de la conception séquentielle, afin de l'adapter à la problématique de la synthèse de systèmes "multisource". Nous introduisons aussi, dans cette première section, la définition de quelques termes et conventions utilisés dans ce chapitre. Dans la section §3.2, nous proposons une étude sommaire des sources d'énergie et de puissance impliquées dans le projet PLATHEE. Il s'agit notamment, du groupe Diesel, de la pile à combustible,

⁽¹⁾Dimensionnement des sources d'énergie et de puissance

⁽²⁾Nous reviendrons plus largement sur la dégradation temporelle des missions, au chapitre 4 et 6. Retenons ici qu'une mission peut être prolongée par une phase de recharge passive, pour remettre à niveau l'état de charge des dispositifs de stockage (surtout les batteries). La contrainte de dégradation temporelle nous permet de contenir ce prolongement en fixant un seuil de faisabilité.

de l'accumulateur électrochimique, du volant d'inertie et du supercondensateur. L'objectif de cette deuxième section est de caractériser ces sources afin de faire ressortir leurs caractéristiques intrinsèques et les conditions d'exploitation pourvoyant une bonne longévité à ces éléments et une efficacité énergétique optimale au système. La stratégie de gestion que nous avons développée dans le cadre de ce projet est présentée à la section §3.3. Cette stratégie de gestion, que nous nommons "gestion fréquentielle", prend en compte les caractéristiques intrinsèques et les conditions d'exploitation les plus adaptées à chacune des sources et permet ainsi d'améliorer la durée de vie des batteries et la réduction simultanée de la consommation de fuel et de la pollution. Un modèle de synthèse en flux de puissance, basé sur cette gestion énergétique, est présenté à la section §3.4. Ce modèle nous permet de déterminer la part de mission destinée à chacune des sources embarquées. Viennent ensuite le dimensionnement du pack de supercondensateurs à la section §3.5 et celui du pack de batteries à la section §3.6. Un bilan du dimensionnement global de la locomotive de démonstration LHyDIE est étudié à la section §3.7. La dernière section de ce chapitre (§3.8) vient conclure cette démarche de synthèse.

3.1 Introduction à la conception systémique séquentielle

3.1.1 Une approche plus adaptée à l'hybridation

La conception systémique séquentielle n'est pas une démarche nouvelle en génie électrique [32, 33, 34, 35]. Telle qu'elle est présentée traditionnellement, la conception séquentielle d'un système électrique consiste à définir son architecture, à le dimensionner, puis à proposer la gestion qui permet d'assurer les missions du cahier des charges. Cette approche traditionnelle est illustrée à la figure 3.1. Dans le cadre de cette étude, l'architecture du démonstrateur est en grande partie spécifiée a priori par la SNCF. L'objectif est de remplacer le groupe Diesel de 600 kW d'une locomotive Diesel BB 63000⁽¹⁾ par un système "multisource" comprenant un plus petit groupe Diesel, un pack de batteries et un pack de supercondensateurs, sans changer le système de traction d'origine de la locomotive. Cette architecture est illustrée à la figure 3.2. L'étape suivante est, normalement, le dimension-

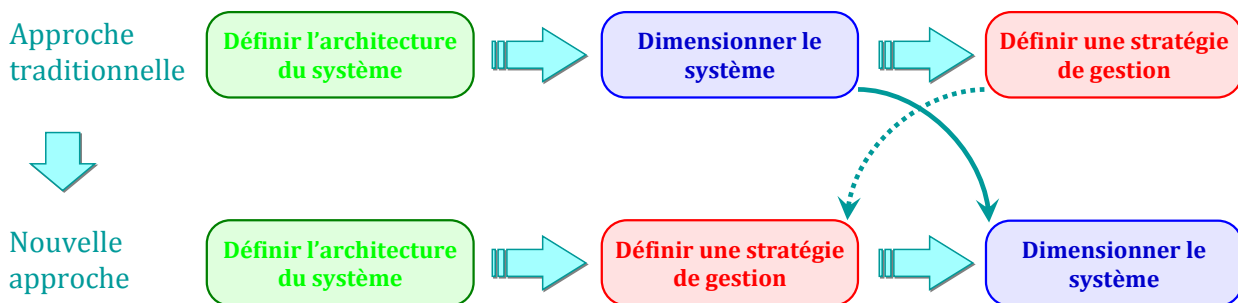


Fig. 3.1: Une nouvelle approche de la conception systémique séquentielle

⁽¹⁾Les BB 63000 sont des locomotives Diesel vieilles d'une cinquantaine années. Aujourd'hui, elles sont affectées aux triages, aux dessertes locales, aux manœuvres et à de menus travaux.

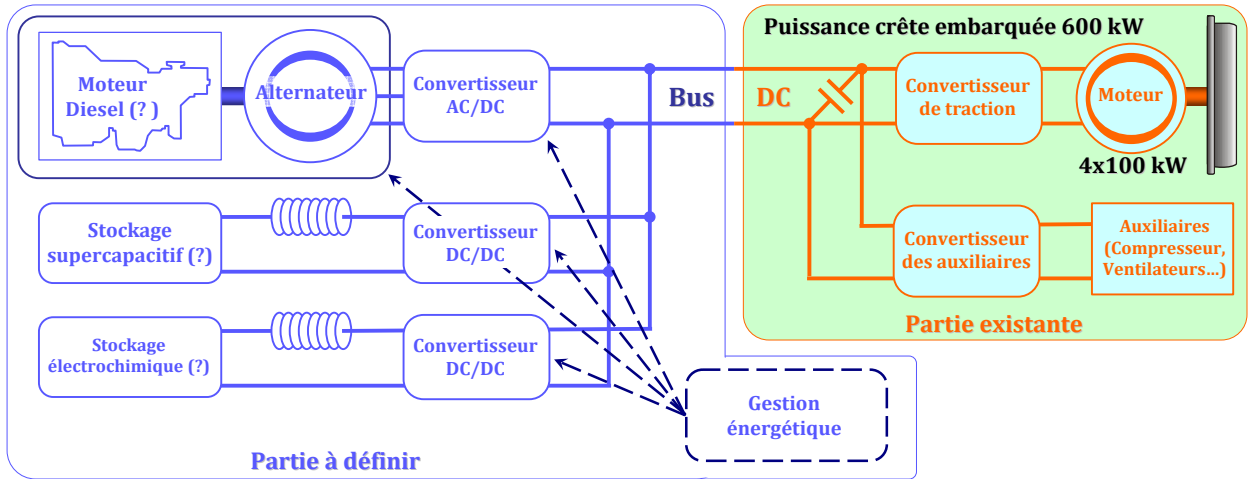


Fig. 3.2: Architecture de la locomotive hybride LHyDIE

nement du système. Mais, dans une configuration multisource⁽¹⁾, il serait hasardeux de dimensionner les sources sans avoir, au préalable, établi la façon dont sera gérée l'énergie. En d'autres termes, nous pensons qu'il serait plus judicieux d'inverser les phases de dimensionnement et de gestion. Dans sa définition traditionnelle, la conception séquentielle fait de la stratégie de gestion une conséquence du dimensionnement. Nous estimons qu'il convient, dans la conception d'un système multisource, d'accorder plus d'importance à la stratégie gestion, de sorte que ce soit la répartition des missions qui nous dicte le dimensionnement des sources. Cette nouvelle approche est illustrée à la figure 3.1 (page précédente).

Cette nouvelle approche de la conception séquentielle permet, d'une part, d'élaborer avec plus de liberté (ce qui n'était pas le cas) une stratégie de gestion intégrant l'ensemble des contraintes technologiques (liées aux éléments de stockage), les critères de faisabilité (coût, encombrement et durée de vie) et, d'autre part, de garantir un dimensionnement au plus juste du système, sans risque d'incompatibilité entre les missions et le système dimensionné. De plus, en plaçant la gestion au centre du processus de conception, nous disposons à travers ses paramètres de degrés de libertés avec lesquels nous balayons les solutions possibles, à la recherche de la solution optimale. Plus concrètement, comme le montre la figure 3.3, la connaissance a priori, de la stratégie de gestion nous permet de faire la répartition de la mission de puissance $P(t)$ en trois missions complémentaires $P_{GE}(t)$, $P_{BT}(t)$ et $P_{SC}(t)$, destinées respectivement au groupe Diesel, au pack de batteries et au pack de supercondensateurs. Il est alors plus facile de dimensionner chacune des sources sur la base de la part de mission qui lui est destinée. Une fois le dimensionnement terminé, il est possible d'évaluer le système dimensionné à l'aide de modèles d'analyse⁽²⁾, puis de réitérer le processus de synthèse en agissant sur les paramètres de la stratégie de gestion. L'objectif étant d'aboutir à des configurations satisfaisant les contraintes d'encombrement

⁽¹⁾Nous insistons sur l'aspect multisource, car le fait d'avoir un générateur d'énergie primaire et deux types de stockage, engendre une difficulté supplémentaire par rapport à l'hybridation série classique où le générateur primaire n'est accompagné que d'un seul type de stockage.

⁽²⁾L'analyse est le processus inverse de la synthèse, les deux processus faisant partie de la démarche de conception systémique séquentielle. Elle est abordée au chapitre 4.

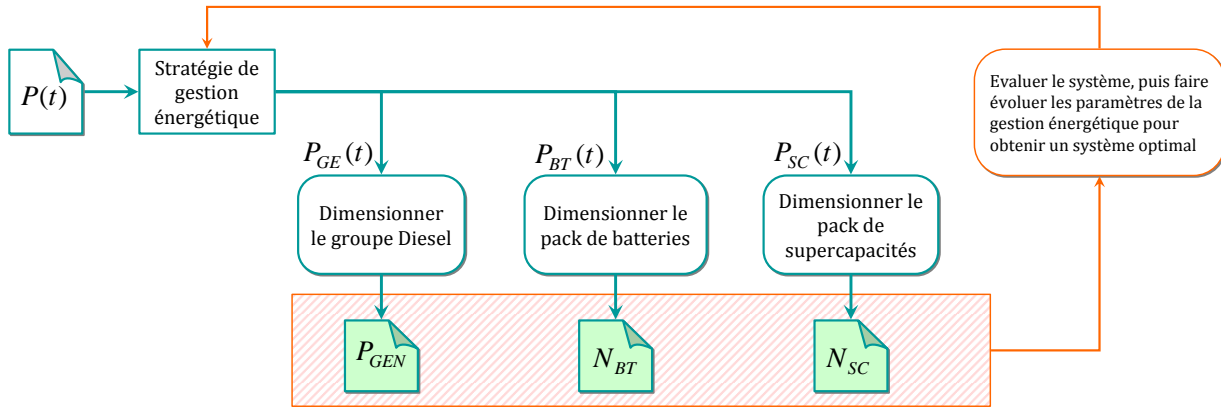


Fig. 3.3: Organigramme de la démarche de synthèse

et de dégradation temporelle des missions qui sont optimales selon les critères économiques et écologiques.

Revenons à l'architecture de LHyDIE, illustrée à la figure 3.2 : trois sources d'énergie et de puissance devront assurer ensemble la mission de traction à travers l'alimentation des quatre bogies moteurs de 100 kW chacun et des auxiliaires. La puissance crête totale est spécifiée à 600 kW. La diversité des sources en présence justifie l'importance que nous accordons à la stratégie de gestion. Il ne s'agit pas seulement de procéder à un partage arbitraire de la mission entre ces sources, mais plutôt d'assurer au mieux la compatibilité entre les parts de mission et les sources mises en face afin d'assurer une bonne longévité de ces dernières et une meilleure efficacité énergétique de la locomotive hybride tout en respectant les contraintes système (encombrement, ...). Nous proposons pour cela une stratégie de gestion que nous appelons « gestion énergétique fréquentielle⁽¹⁾ », qui intègre d'une part les caractéristiques intrinsèques de chacune des sources et d'autre part favorise la réduction de la consommation et de la pollution.

3.1.2 Définitions et conventions

Nous avons défini au chapitre 2, les notions de "source de puissance" et de "source d'énergie". Rappelons que nous désignons par "source d'énergie électrique", une source pouvant délivrer une puissance électrique moyenne donnée, sur une durée du même ordre de grandeur que celle de la mission typique que doit assurer le système. C'est le cas du groupe Diesel et de la pile à combustible. Même si ces éléments sont dimensionnés par la puissance qu'ils sont amenés à fournir, ils fournissent la totalité de l'énergie nécessaire à la mission. C'est pour cela qu'ils sont qualifiés de "sources d'énergie".

Nous désignons par "source de puissance électrique", une source dont le bilan énergétique est nul, aux pertes près, sur la durée totale de la mission typique du système. Ainsi, les éléments de stockage, batteries, volants d'inertie et supercondensateurs, relativement à

⁽¹⁾Nous l'appelons ainsi car elle est basée, en partie, sur des considérations fréquentielles.

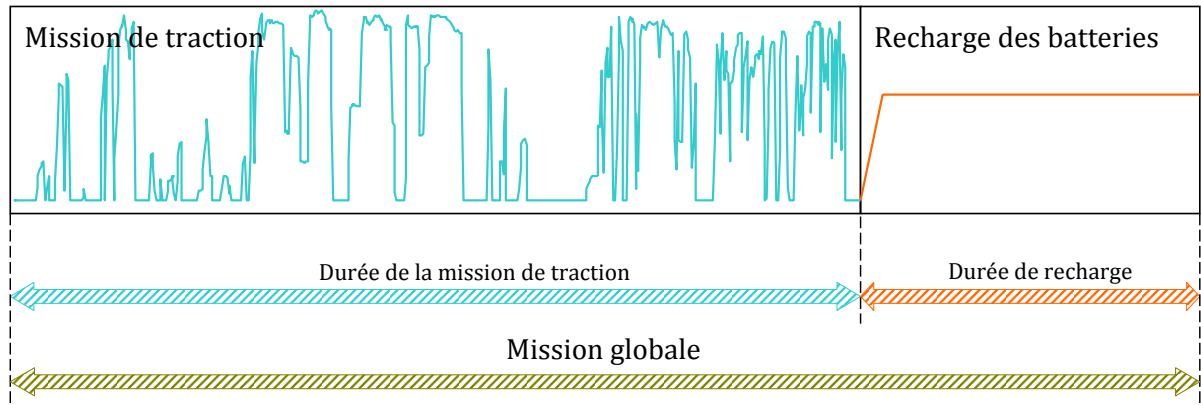


Fig. 3.4: Contrainte de dégradation temporelle

une mission de véhicule hybride autonome⁽¹⁾, sont des sources de puissance.

Remarque: Même si les batteries sont en grande partie déchargées pendant la mission de traction puis rechargées à l'arrêt, on peut quand même les qualifier de "sources de puissance" si l'on étend la mission de traction au temps de recharge (voir figure 3.4). Rappelons que nous avons associé ce temps de recharge à l'arrêt à une "contrainte de dégradation temporelle" de la mission globale. Nous reviendrons plus largement sur cette problématique au chapitre 4.

La convention de signe relative aux flux de puissance est la suivante : pour les générateurs de puissance (éléments de stockage), une puissance positive correspond à une décharge et une puissance négative à une charge ; pour les générateurs d'énergie la puissance est constamment positive et correspond à une fourniture de puissance ; enfin, pour la mission de puissance (traction + auxiliaires + pertes), une puissance positive correspond à une consommation d'énergie et une puissance négative à un rejet d'énergie (la récupération au freinage par exemple).

3.2 Caractérisation des sources d'énergie et de puissance

L'objectif de la caractérisation est d'établir un modèle comportemental des sources embarquées. En effet, chacune des sources du système peut être modélisée comme un sous-système admettant des entrées et des sorties. La connaissance des relations entre les entrées et les sorties permet d'optimiser l'utilisation de la source concernée. Pour les générateurs d'énergie, la caractérisation consiste au repérage du point (ou de la zone) de fonctionnement donnant lieu à la meilleure efficacité énergétique et à la pollution minimale. Nous étudierons en particulier le cas du groupe Diesel et de la pile à combustible. Quant aux éléments de stockage, la caractérisation consiste à les localiser dans le plan de Ragone, afin de mieux calibrer leur participation aux missions.

⁽¹⁾Sur un véhicule hybride autonome, les éléments de stockage ne font que restituer l'énergie stockée. Ils ne sont donc pas des sources d'énergie, mais plutôt des sources de puissance.

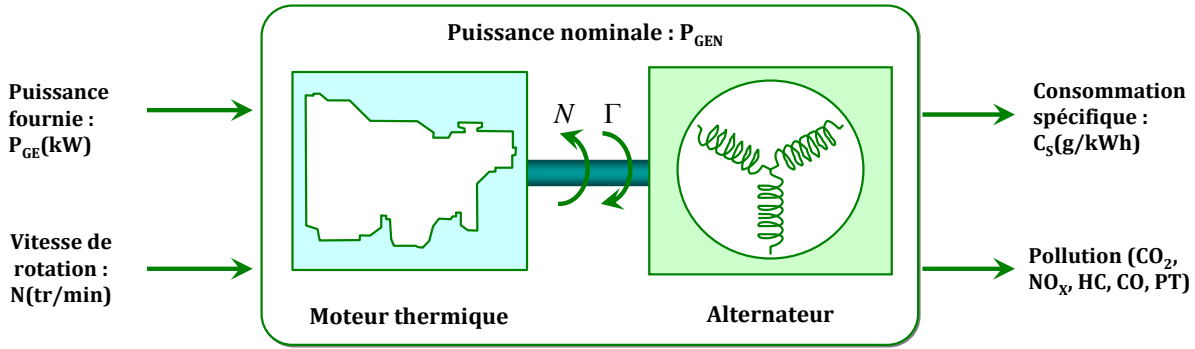


Fig. 3.5: Une représentation système du groupe électrogène Diesel

3.2.1 Groupe Diesel

Le groupe Diesel est l'élément central de la locomotive hybride LHyDIE. Il fournit la totalité de l'énergie, pertes comprises, nécessaire au déroulement des missions. De plus, le groupe Diesel est au centre des préoccupations de réduction de la consommation de fuel, de la pollution et des nuisances sonores. A lui seul, le groupe Diesel est un système extrêmement complexe. Il convient donc, dans une vision système, de focaliser uniquement sur les interactions entre le groupe Diesel et son environnement.

La figure 3.5 montre une représentation système du groupe électrogène Diesel. Le contrôle du groupe se fait à travers la puissance fournie P_{GE} et la vitesse de rotation du moteur thermique N (tr/min). En sortie du modèle, il y a la consommation spécifique C_s (g/kWh) et les émissions polluantes (CO_2 , NO_x , HC, CO et les particules) émises. Généralement, les cartographies issues d'essais expérimentaux ou fournies par les constructeurs permettent d'établir la courbe de consommation optimale du groupe Diesel. Les essais de pollution sont onéreux et leur importance stratégique les rend inaccessibles. Aussi notre étude se limite t-elle aux émissions de CO_2 et à la consommation de gasoil. Sachant que ces deux éléments sont directement liés⁽¹⁾, nous retenons la consommation spécifique comme l'unique sortie du sous-système groupe Diesel.

Les travaux de M. Osenga [36] et de W. Koczara [14, 12, 13, 15] démontrent qu'il est plus intéressant en termes d'efficacité énergétique, de faire fonctionner le groupe Diesel en régime variable (vitesse variable) qu'en régime constant. Les essais publiés par W. Koczara [12] sont assez probants (voir figure 3.6). Ces essais ont été faits sur un moteur thermique de 2.8 L. Le régime variable présente une économie non négligeable de gasoil par rapport au régime constant, surtout pour les faibles charges. Globalement, quel que soit le régime, le BSFC⁽²⁾ (g/kWh) qui correspond au coût, en quantité de fuel, par kilowattheure produit (L/kWh ou g/kWh) est d'autant meilleur que le groupe fonctionne au voisinage de sa puissance nominale. La figure 3.6 montre, qu'à vitesse constante, la consommation spécifique est optimale à la charge nominale et se dégrade rapidement lorsque la charge

⁽¹⁾Un Litre de gasoil produit environ 2.662 kg de CO_2 .

⁽²⁾BSFC signifie "Brake specific fuel consumption".

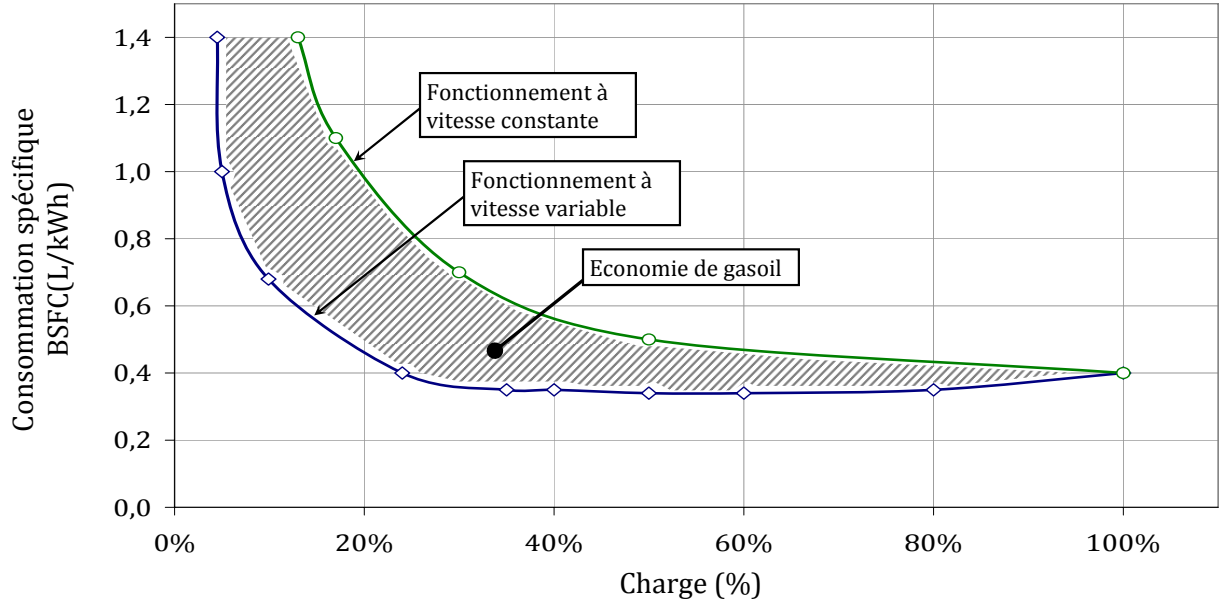
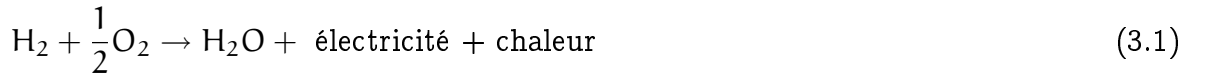


Fig. 3.6: Facteurs d'influence de l'efficacité énergétique d'un groupe Diesel.

diminue. On note par contre, dans le cas d'un fonctionnement en régime variable, que cette dégradation est présente mais retardée.

3.2.2 Pile à combustible

La technologie de pile la plus fréquemment utilisée, surtout à bord des systèmes mobiles, est la PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) qui comporte en particulier une membrane échangeuse de protons, avec du platine pour catalyser la réaction globale :



La réaction chimique s'accompagne d'une variation d'entropie ΔS ($\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) laissant, à température (T) et à pression données, une enthalpie libre ΔG ($\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$) transformable en énergie électrique, le reste étant transformé en chaleur au cours de la réaction chimique dans la pile [37, 38].

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S \quad (3.2)$$

Le rapport de l'enthalpie libre sur l'enthalpie standard ΔH ($\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$) de la réaction de formation d'eau correspond au rendement thermodynamique de la réaction chimique.

$$\eta_{\max} = \frac{\Delta G}{\Delta H} \quad (3.3)$$

Dans les conditions standards, ce rendement est de 83% pour la formation d'eau liquide ou de 95% pour la formation d'eau sous forme gazeuse.

En aval de la réaction chimique, l'enthalpie libre génère la force électromotrice standard E_{th} de la pile :

$$E_{\text{th}} = -\frac{\Delta G}{nF} \quad \text{à température et pression standards (300 K et 1 bar)} \quad (3.4)$$

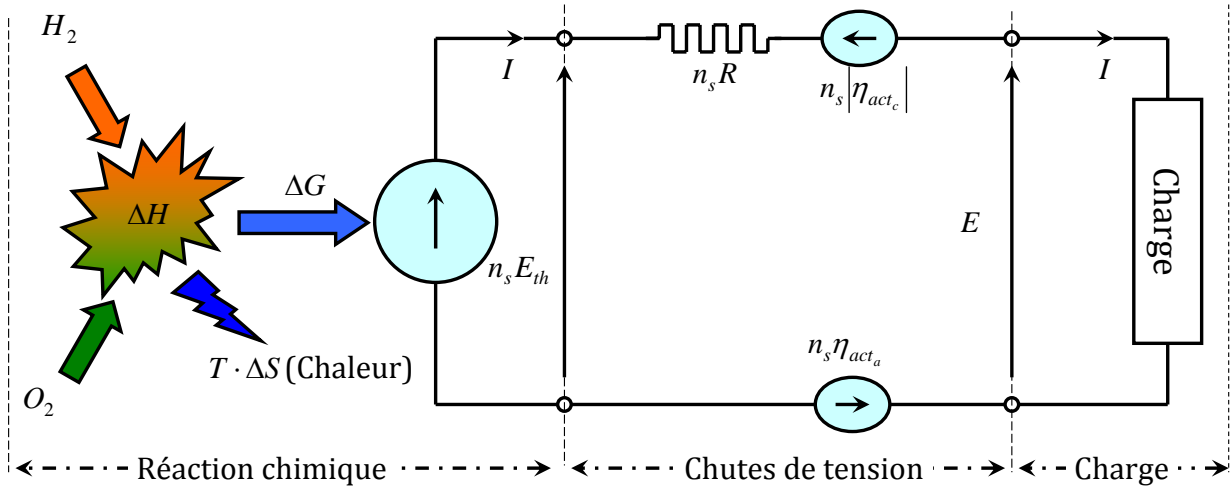


Fig. 3.7: Modèle thermo-électrique la pile à combustible

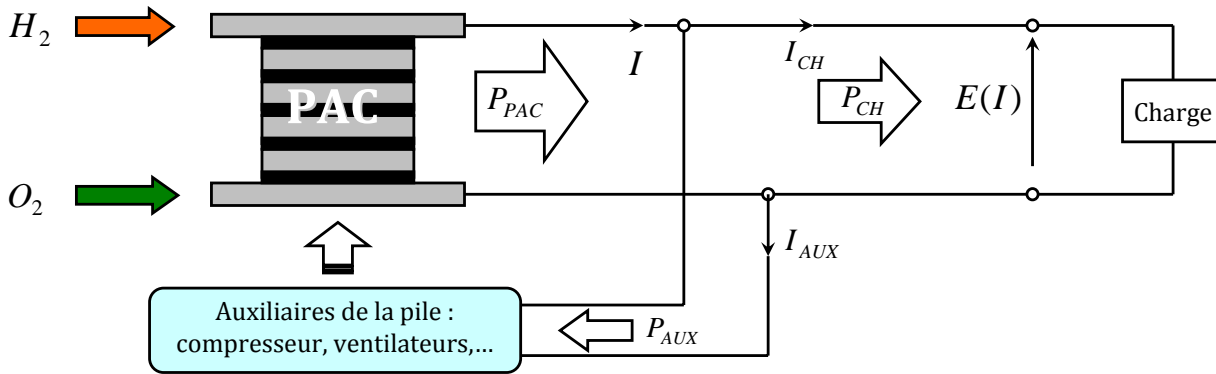


Fig. 3.8: Modèle global simplifié du système pile à combustible

n étant le nombre de moles d'électrons mis en jeu dans la réaction (2 dans le cas de la pile) et F la constante de Faraday (96493 C.mol^{-1}).

La figure 3.7 montre le modèle thermo-électrique de la pile à combustible. La pile est constituée d'un empilement de n_s cellules en série. E_{th} est la tension à vide d'une cellule. Lorsque la pile débite un courant I , la tension réelle $E(I)$ vue par la charge est égale à $n_s \cdot E_{th}$ de laquelle se soustraient la chute ohmique à travers la résistance de sortie $n_s \cdot R$, les surtensions d'activation aux électrodes $n_s \cdot \eta_{act_a}(I)$ (anode) et $n_s \cdot |\eta_{act_c}(I)|$ (cathode).

$$E(I) = n_s \cdot E_{th} - (n_s \cdot R)I - n_s \cdot \eta_{act_a}(I) - n_s \cdot |\eta_{act_c}(I)| \quad (3.5)$$

On introduit alors un rendement voltaïque (ou rendement en tension) :

$$\eta_E = \frac{E(I)}{n_s \cdot E_{th}} \quad (3.6)$$

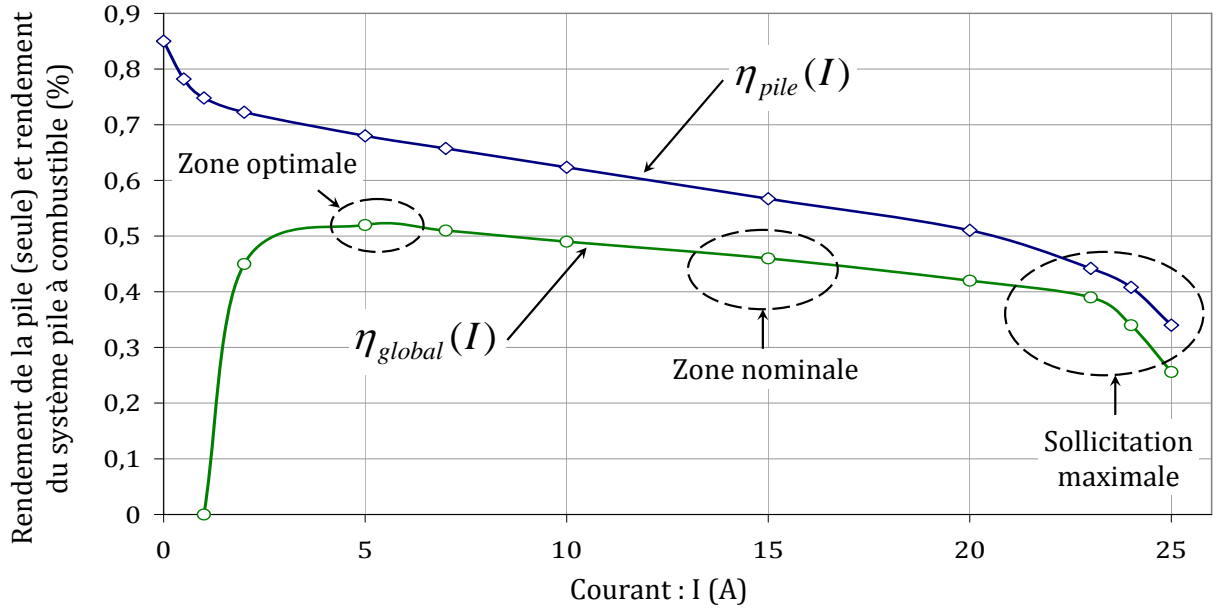


Fig. 3.9: Rendement de la pile à combustible PEM de 200 W (ELECTROCHEM)

En tenant compte des fuites faradiques⁽¹⁾, le rendement de la pile, prise isolément, s'écrit :

$$\eta_{pile} = \eta_{max} \cdot \eta_E \cdot \eta_f \quad (3.7)$$

Mais la pile ne peut pas fonctionner de façon isolée : elle est entourée de plusieurs auxiliaires assurant la compression des gaz, la ventilation, etc. Le modèle global du système pile à combustible est donné à la figure 3.8. Les auxiliaires ont une consommation minimale P_{min} à laquelle s'ajoute une consommation $\alpha \cdot P_{pac}$ proportionnelle à la puissance délivrée par la pile.

$$P_{aux} = P_{min} + \alpha \cdot P_{pac} \quad (3.8)$$

Pour une pile PEM de 200 W (de technologie ELECTROCHEM), P_{min} vaut 10 W et le coefficient α vaut 0.1.

Le bilan global du système pile à combustible s'écrit alors :

$$\eta_{global} = \eta_{max} \cdot \eta_E \cdot \eta_f \cdot \frac{P_{pac} - P_{aux}}{P_{pac}} \quad (3.9)$$

La figure 3.9 montre le rendement de la pile seule $\eta_{pile}(I)$ et le rendement global du système pile à combustible $\eta_{global}(I)$ en fonction du courant I débité par la pile. Les tracés ont été établis de façon expérimentale pour la pile ELECTROCHEM de puissance 200 W dont le courant nominal vaut 15 A. Il apparaît que le rendement intrinsèque de la pile décroît de façon monotone avec la demande de courant. Mais la consommation des auxiliaires fait

⁽¹⁾Il existe une différence entre la valeur du courant débité par la pile pour une tension donnée, et celle du courant théorique correspondant à la transformation totale des réactifs. Rigoureusement, cette fuite est matérialisée par un rendement faradique $\eta_f = I/I_{max}$ proche de 1.

qu'il existe, sur la courbe du rendement global, un courant optimal en deçà duquel le rendement global est très mauvais et au delà duquel le rendement global se dégrade lentement, puis se précipite au courant maximum admissible (25 A). Généralement, comme c'est le cas pour la pile ELECTROCHEM (figure 3.9), le courant optimal est différent du courant nominal, car le choix du courant nominal est un compromis entre "plus de courant" et efficacité énergétique⁽¹⁾.

L'optimisation du fonctionnement d'une pile à combustible sur un véhicule hybride dépend de la configuration de ce dernier. Dans une configuration (PAC + Stockage), il est préférable de faire fonctionner la pile au plus près de sa puissance optimale (plus basse que la puissance nominale), afin de rentabiliser la quantité d'hydrogène consommée. Mais, dans une configuration (PAC + Diesel + Stockage)⁽²⁾, où la pile est mise en concurrence avec le Diesel, il est plus judicieux de faire fonctionner la pile à sa puissance nominale (voire plus), pour augmenter le taux d'énergie "propre" dans la consommation globale du véhicule. En effet, l'augmentation de la participation de la pile entraîne la réduction de la consommation de gasoil et de la pollution. En contrepartie, l'efficacité énergétique de la pile est moins bonne.

3.2.3 Batteries, volants d'inertie et supercondensateurs

Les éléments de stockage sont caractérisés par l'énergie qu'ils peuvent stocker et la puissance qu'ils peuvent délivrer. Globalement, plus un élément est intéressant sur le plan énergétique, moins il l'est sur le plan de la puissance, et vice-versa. Les batteries admettent une densité d'énergie allant de 3 à 300 Wh/kg contre 0.4 à 15 Wh/kg seulement pour les supercondensateurs. Par contre, sur le plan de la puissance, les supercondensateurs admettent 500 à 10^4 W/kg contre 10 à 500 W/kg seulement pour les batteries. La figure 3.10 montre dans le plan énergie – puissance, la localisation des régions correspondant aux différents éléments de stockage : il s'agit du plan de Ragone [39, 40]. Les frontières des régions balisées sont déterminées sur la base des pertes internes et/ou les fuites dans les éléments de stockage. Les principaux éléments de stockage sont classés, du plus dense en énergie au plus dense en puissance, avec dans l'ordre batteries, volants d'inertie et supercondensateurs. Le plan de Ragone contient aussi une indication sur la durée des applications adaptées à chaque élément. Avec une forte densité d'énergie et une faible densité de puissance, les batteries sont plus indiquées pour les applications de durée typique de l'ordre de quelques minutes à plusieurs heures. A contrario, les supercondensateurs sont plus adaptés aux applications de durée typique de l'ordre de quelques secondes à quelques minutes [9, 22]. Les volants d'inertie se situent globalement entre les batteries et les supercondensateurs, tout en étant très voisins de ces derniers.

⁽¹⁾L'augmentation du courant entraîne une chute de tension de plus en plus élevée donc un rendement de plus en plus faible.

⁽²⁾Cette configuration est prévue sur le démonstrateur LHyDIE. Nous abordons brièvement, cette configuration au chapitre 5, lors du développement de la gestion temps réel.

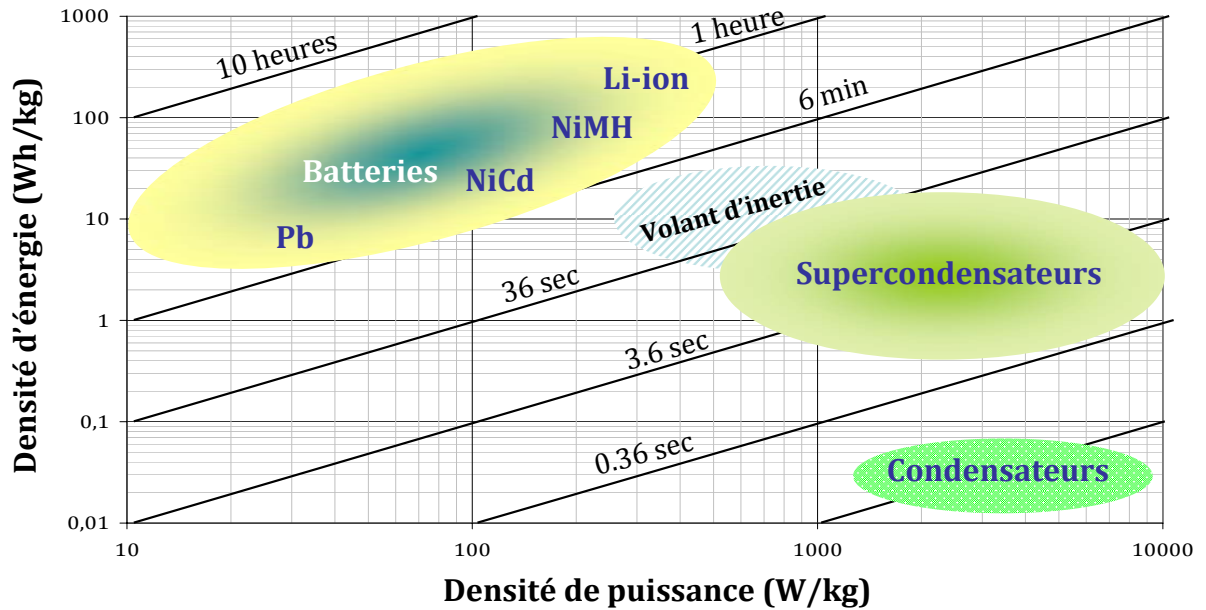


Fig. 3.10: Plan de Ragone des éléments de stockage

En dehors de la caractérisation dans le plan de Ragone des éléments de stockage, ces technologies se différencient largement par leur durée de vie. Les batteries sont les plus fragiles : elles n'offrent que 1000 voire 2000 cycles au maximum. Sur ce critère de cyclage, les supercondensateurs sont remarquablement meilleurs : 500000 cycles environ. Mais l'élément de stockage le plus durable reste le volant d'inertie. Typiquement, pour une application de type locomotive hybride, un volant fonctionnerait plus de 20 ans contre 10 à 15 ans pour le supercondensateur et 5 ans pour la batterie⁽¹⁾.

3.2.4 Conclusion

Dans cette section, nous avons présenté une première caractérisation des sources d'énergie et de puissance impliquées dans le projet PLATHEE. Nous avons montré notamment que le groupe Diesel présente une bonne efficacité énergétique et un impact environnemental minimal, lorsqu'il fonctionne en régime variable et qu'il est sollicité, le plus souvent possible, à sa puissance nominale. Nous avons aussi montré que, malgré l'écart relativement important entre la puissance optimale d'une pile à combustible et sa puissance nominale, il est préférable, dans une application où la pile est mise en concurrence avec un moteur Diesel, de la faire fonctionner le plus souvent possible près de sa puissance nominale. Ainsi, nous privilégions la réduction de la pollution à l'économie d'hydrogène. Quant aux éléments de stockage, nous retenons que les batteries présentent des aptitudes en énergie massique, meilleures que celles des supercondensateurs, alors que, sur le plan de la puissance, ces derniers sont plus intéressants. De plus, nous notons une fragilité, en termes de durée de vie, des batteries qui n'offrent qu'un nombre limité de cycles alors que les supercondensateurs présentent une bonne longévité.

⁽¹⁾Cette durée dépend du type de cyclage qui diffère entre batteries et supercondensateurs.

3.3 La gestion énergétique fréquentielle

La gestion énergétique "*fréquentielle*" est basée sur le respect des sources d'énergie et de puissance, c'est-à-dire l'adéquation entre la part de mission assurée par chaque source et la nature intrinsèque de cette dernière. L'objectif de cette approche est de faire coïncider dans un même repère les composantes de la mission et les caractéristiques des sources mises en face. Dans cette section, nous présentons le principe de la gestion fréquentielle et nous montrons, à l'aide d'un exemple réel, qu'elle permet de réaliser l'adéquation entre parts de mission et sources.

3.3.1 Une vision fréquentielle des sources

La vision fréquentielle des dispositifs de stockage d'énergie n'est pas une nouveauté en génie électrique. Elle transparaît assez clairement dans l'étude du plan de Ragone [39, 40] abordée à la section §3.2.3. Nous proposons dans cette sous-section notre vision fréquentielle des sources de puissance et d'énergie.

Les supercondensateurs sont des sources de forte densité de puissance contre une faible densité d'énergie (2 kW/kg et 4.1 Wh/kg pour une cellule EPCOS 5000 F/2.5 V⁽¹⁾). Ils sont plus aptes à supporter des cycles de charge et de décharge rapides (à fréquence élevée). Ils offrent un nombre relativement élevé de cycles (≈ 500000 cycles).

Contrairement aux supercondensateurs, les batteries ont une densité d'énergie plus élevée mais une densité de puissance beaucoup plus faible (0.325 kW/kg et 60 Wh/kg pour une cellule d'accumulateur NiCd 1.2 V/135 Ah). De plus, les batteries sont des éléments extrêmement délicats, très sensibles à la profondeur des cycles de charge et décharge. Par ailleurs, il est important de limiter la fréquence des cycles des batteries car elles n'offrent qu'un nombre faible de cycles (≈ 2000 cycles de 80% pour le NiCd).

Les notions de densité de puissance et d'énergie renvoient à une notion de fréquence. Soient ρ_e et ρ_p , respectivement, la densité d'énergie et la densité de puissance d'un élément de stockage. Le rapport :

$$f_p [\text{Hz}] = \frac{\rho_p [\text{W/kg}]}{\rho_e [\text{J/kg}]} \quad (3.10)$$

est équivalent à une fréquence. Cette fréquence est une indication caractérisant chaque type de stockage⁽²⁾. En reportant sur un axe fréquentiel les différentes régions du plan de Ragone à l'aide de l'opération Eq.3.10, nous obtenons une projection du plan de Ragone dans un espace fréquentiel unidirectionnel, comme le montre la figure 3.11. Nous notons que les batteries couvrent les fréquences entre $4e^{-5}$ Hz et $3e^{-3}$ Hz, les volants d'inertie vont de $4e^{-3}$ Hz à $7e^{-2}$ Hz et les supercondensateurs couvrent les fréquences de $3e^{-2}$ Hz à 2 Hz. Il est donc possible d'établir une relation d'ordre dans un référentiel fréquentiel, entre

⁽¹⁾La référence de cette cellule est : B49410B2506Q000.

⁽²⁾Cette fréquence reflète la fréquence des cycles que peut supporter l'élément. Pour le supercondensateur EPCOS 5000 F/2.5 V, caractérisé par $\rho_e = 4.1$ Wh/kg et $\rho_p = 2$ kW/kg, on obtient $f_p = 0.135$ Hz.

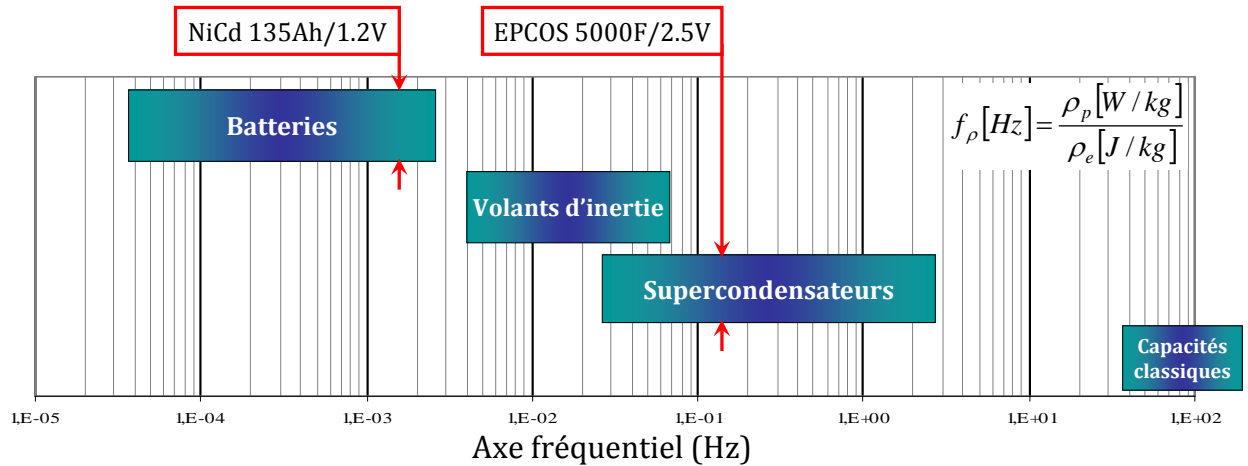


Fig. 3.11: Projection du plan de Ragone sur un axe fréquentiel

les différents éléments de stockage. Des petites fréquences vers les hautes fréquences, les éléments de stockage peuvent être classés dans l'ordre batteries, volants d'inertie, supercondensateurs.

Sachant que le fonctionnement du groupe Diesel, près de sa puissance nominale, est la meilleure condition pour polluer moins et économiser du gasoil, ce dernier peut être considéré comme une source d'énergie à puissance quasi continue donc de fréquence nulle (ou extrêmement faible). Quant à la pile à combustible, comme nous l'avons souligné à la section §3.2.2, elle est semblable au groupe Diesel. Nous proposons donc le classement suivant : piles à combustible, groupes Diesel, batteries, volants d'inertie, supercondensateurs, dans l'ordre croissant de la fréquence, comme le montre la figure 3.12. Notons, pour finir, que l'axe fréquentiel est orienté dans le même sens que l'axe de densité de puissance et dans le sens opposé de l'axe de densité d'énergie.

3.3.2 Principe de la gestion fréquentielle

Comme nous l'avons souligné plus haut, l'objectif de la gestion fréquentielle est d'établir la compatibilité entre les parts de mission et les sources mises en face. A la vision fréquentielle des sources d'énergie et de puissance, nous allons donc associer une vision fréquentielle des missions. La figure 3.13 montre la répartition d'une mission ferroviaire entre les différentes sources impliquées, dans un espace fréquentiel. La figure 3.13 peut entraîner une légère confusion. Il pourrait paraître étrange qu'il n'y ait pas de concordance entre la position fréquentielle des sources sur le graphe de la transformée de Fourier et les fréquences caractérisant ces sources dans le repère de classification fréquentiel de la figure 3.11. En effet, les fréquences caractérisant les éléments de stockage n'ont pas la même signification que les fréquences correspondant à la transformée de Fourier. Les premières reflètent (ou sont du même ordre que) les fréquences des cycles admissibles par

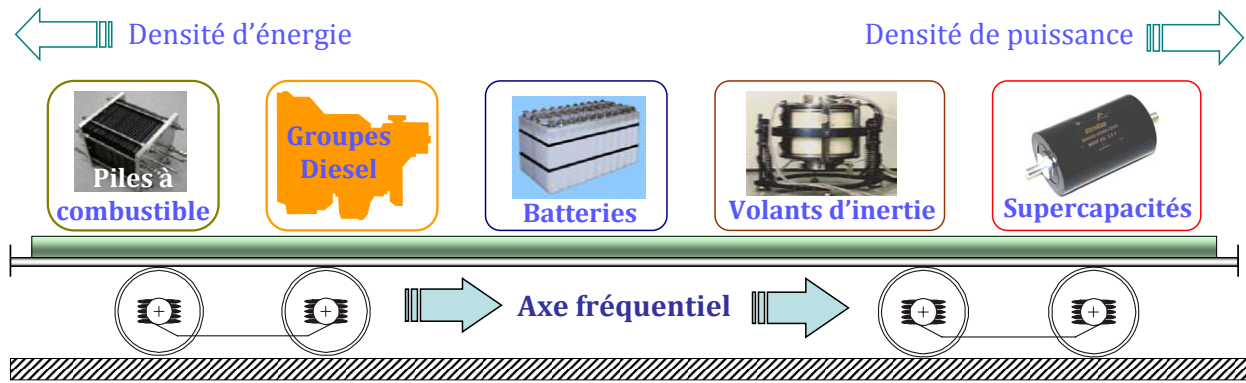


Fig. 3.12: Vision fréquentielle des sources impliquées dans l'hybridation ferroviaire

les éléments, alors que les dernières sont directement liées à la dynamique temporelle des missions⁽¹⁾. Le principe de la gestion énergétique fréquentielle s'énonce comme suit :

Énoncé: Les éléments de stockage "rapides" (supercondensateurs, volants d'inertie) assurent les composantes de hautes fréquences de la mission. Les générateurs d'énergie (groupe Diesel et PAC) assurent continûment la moyenne de la mission et le reste, c'est-à-dire les composantes de basses fréquences, reviennent aux batteries.

Dans la réalité, une fois le groupe Diesel choisi, il n'est pas question de le faire tourner à la puissance moyenne de la mission en cours⁽²⁾, mais plutôt à sa puissance nominale (au groupe), tant que faire se peut. Nous reformulons donc le principe de la façon suivante :

Énoncé: Les éléments de stockage rapides (supercondensateurs, volants d'inertie) assurent les composantes de hautes fréquences de la mission. Les générateurs d'énergie (groupe Diesel et PAC) opèrent le plus souvent possible à leur puissance nominale et le reste de la mission revient aux batteries.

La figure 3.14 illustre le principe de la gestion fréquentielle telle qu'elle est mise en œuvre pour le dimensionnement des sources embarquées. Notons que dans ce modèle n'interviennent que des flux de puissance. Il s'agit en effet d'un modèle en flux de puissance. Ce type de modèle nous permet de faire la synthèse énergétique de l'engin sans entrer dans les complications électriques. La mission de puissance $P(t)$ est filtrée par un filtre passe-bas. La partie constituée de composantes de hautes fréquences $P_{SC}(t)$ est utilisée pour dimensionner le pack de supercondensateurs. La partie constituée d'harmoniques de basses fréquences de laquelle est soustraite la puissance nominale du groupe Diesel, est utilisée pour dimensionner le pack de batteries ($P_{BT}(t)$). C'est donc le choix de la fréquence de filtrage F_{SC} et de la puissance nominale P_{GEN} du groupe Diesel qui détermine les parts de mission destinées au pack de supercondensateurs et au pack de batteries.

⁽¹⁾D'un côté, il y a des cycles de charge et de décharge et de l'autre, il y a des harmoniques. La compatibilité entre missions et sources se situe ailleurs. Elle est traitée à la sous-section suivante.

⁽²⁾La moyenne d'une mission n'est connue qu'à la fin de cette dernière. De plus, la puissance nominale du groupe ne peut pas correspondre à la moyenne de toutes les missions à la fois.

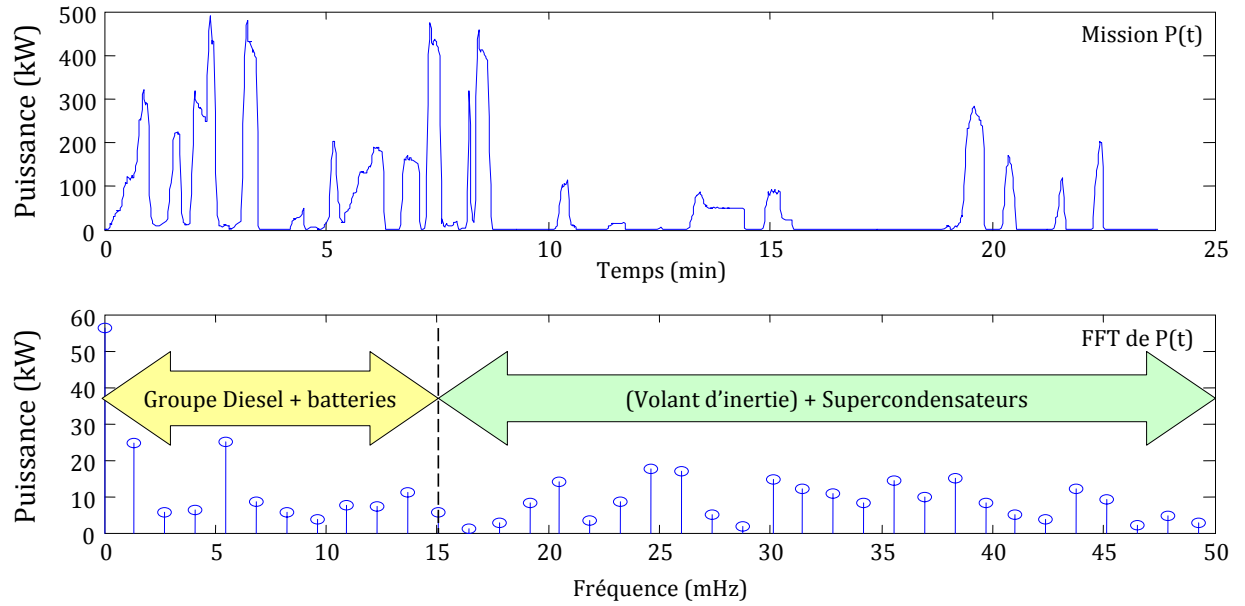


Fig. 3.13: Croisement entre missions et sources dans un référentiel fréquentiel

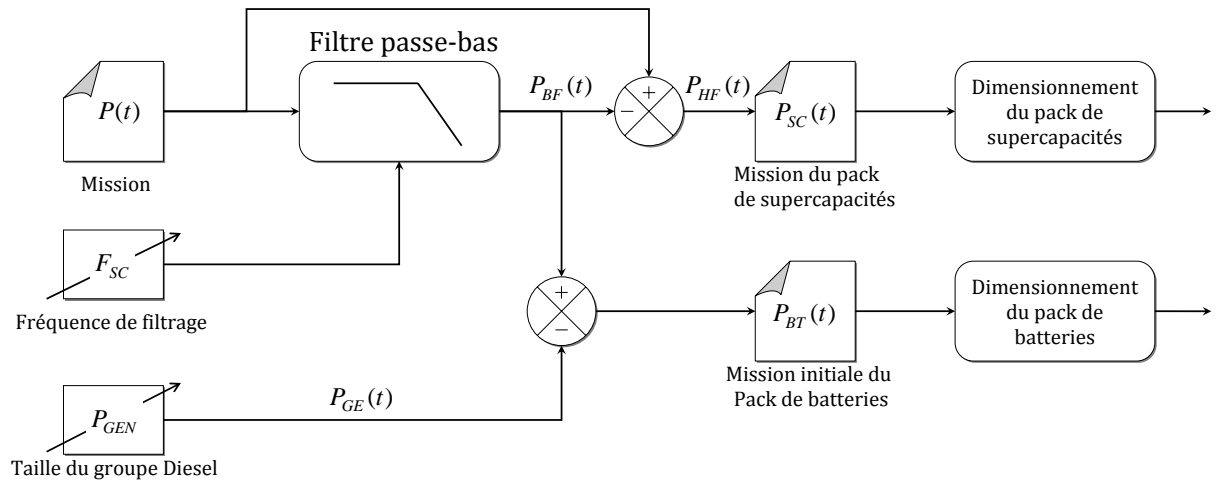


Fig. 3.14: Principe de la gestion énergétique fréquentielle

3.3.3 Adéquation entre missions et sources

Le premier intérêt de la gestion fréquentielle est d'abord la compatibilité entre les composantes de la mission et les caractéristiques intrinsèques des sources mises en face. Nous montrerons, au chapitre 4, qu'en plus du respect des sources, la gestion énergétique fréquentielle tient compte de la durée de vie des batteries, qui sont les éléments les plus fragiles du système et elle permet une économie non négligeable de gasoil. Pour le moment, focalisons-nous sur l'adéquation entre missions et sources.

Les paramètres d'entrée du modèle en flux de puissance de la figure 3.14 sont la fréquence du filtre F_{SC} et la puissance nominale du groupe Diesel P_{GEN} . Symboliquement, la batterie est prise en "sandwich" entre les supercondensateurs dimensionnés par le choix de F_{SC} et le groupe Diesel P_{GEN} choisi. En effet, la mission $P(t)$ est filtrée et séparée en deux

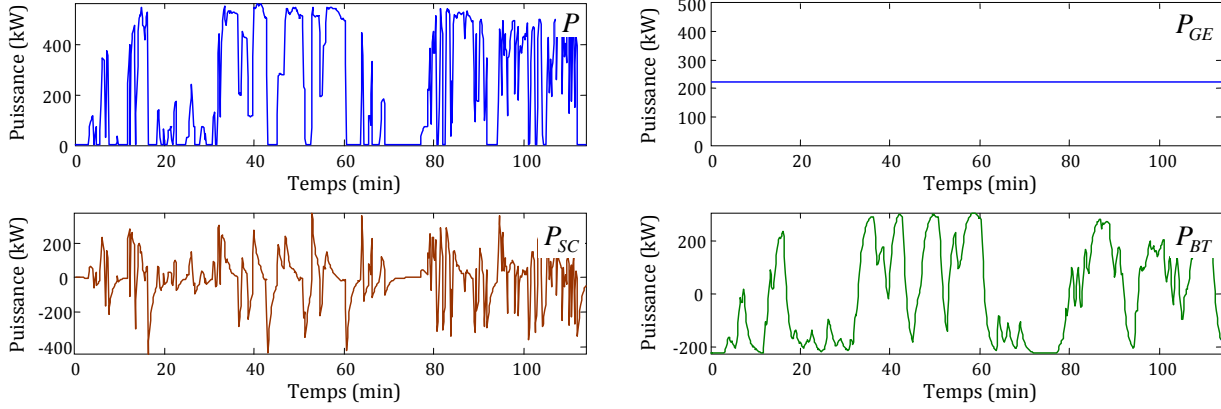


Fig. 3.15: Exemple de répartition de mission par la gestion fréquentielle

parties : la partie P_{HF} correspond aux fréquences supérieures et la partie P_{BF} correspond aux basses fréquences.

$$\begin{cases} P_{BF}(s) = \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot F_{SC}}{2 \cdot \pi \cdot F_{SC} + s} \right) \cdot P(s) \\ P_{HF}(s) = P(s) - P_{BF}(s) = \left(\frac{s}{2 \cdot \pi \cdot F_{SC} + s} \right) \cdot P(s) \end{cases} \quad (3.11)$$

La mission P_{HF} est directement dirigée vers le pack de supercondensateurs. La mission P_{BF} est partagée entre le groupe Diesel et les batteries de la façon suivante : le groupe Diesel est supposé opérer à son régime nominal et le reste de la mission est envoyé aux batteries.

$$\begin{cases} P_{GE}(s) = P_{GEN} \\ P_{SC}(s) = P_{HF}(s) \\ P_{BT}(s) = P_{BF}(s) - P_{GEN} \end{cases} \quad (3.12)$$

Ces équations peuvent être implantées dans Matlab\Simulink ou directement programmées en .m, .c ou .cpp (voire dans un tableau type excel).

La figure 3.15 montre les résultats de la simulation du système d'équations Eq.3.11 et Eq.3.12, pour un échantillon de mission de desserte locale⁽¹⁾. Le groupe Diesel est choisi de sorte que sa puissance nominale coïncide avec la puissance moyenne de la mission (≈ 220 kW) ; la fréquence de filtrage est fixée à 3 mHz. Les courbes de puissance $P_{SC}(t)$ et $P_{BT}(t)$ se différencient assez nettement. La mission du pack capacitif présente des dynamiques rapides alors que celle des batteries évolue assez lentement. De plus, sur un même intervalle de temps, les supercondensateurs subissent une multitude de cycles⁽²⁾ contre un nombre nettement plus faible de cycles pour les batteries. D'après la caractérisation des sources, il y a visiblement compatibilité entre parts de mission et sources mise en face.

⁽¹⁾Rappelons que la puissance représentant la mission intègre les pertes du système de traction et la consommation des auxiliaires.

⁽²⁾alternance de charges et de décharges

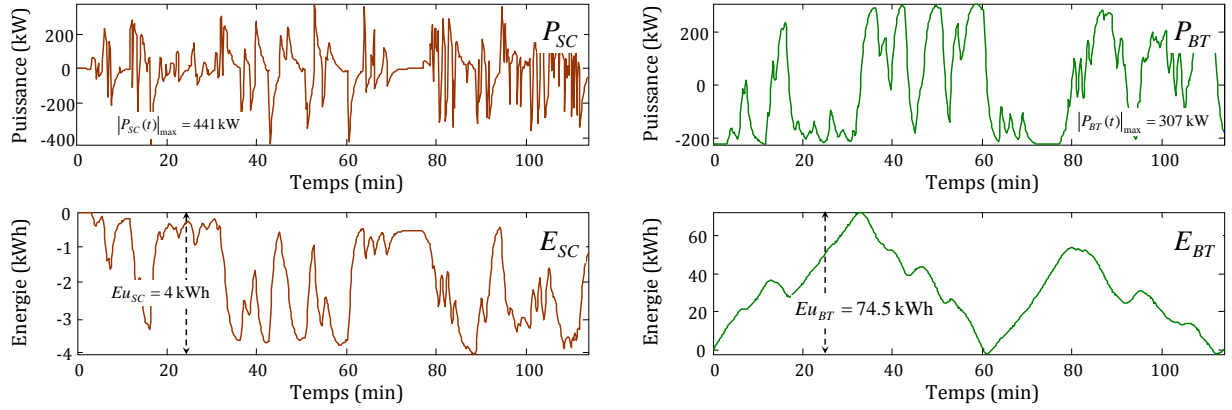


Fig. 3.16: Intégration des missions $P_{SC}(t)$ et $P_{BT}(t)$

Nous pouvons aller encore plus loin dans la démonstration de cette compatibilité. En effet, lorsque nous calculons l'intégrale des missions⁽¹⁾ $P_{SC}(t)$ et $P_{BT}(t)$, nous observons davantage les différences en nombre de cycles⁽²⁾ et en dynamique des deux missions (voir figure 3.16). De plus, le calcul de l'énergie utile issue des intégrales de puissance et le relevé des puissances maximales, nous donne :

$$\begin{cases} |P_{SC}|_{\max} = 441 \text{ kW} \\ Eu_{SC} = 4.1 \text{ kWh} \end{cases} \quad \begin{cases} |P_{BT}|_{\max} = 307 \text{ kW} \\ Eu_{BT} = 74.5 \text{ kWh} \end{cases} \quad (3.13)$$

Pour chacune des deux missions, le rapport de la puissance crête sur l'énergie utile (homogène à une fréquence) est une caractérisation du type de stockage qui est le mieux adapté à cette mission. Dans le cas de nos deux missions de stockage, nous obtenons :

$$\begin{cases} f_{\rho,sc} = \frac{|P_{SC}|_{\max}}{Eu_{SC}} = 30 \text{ mHz} \\ f_{\rho,bt} = \frac{|P_{SC}|_{\max}}{Eu_{SC}} = 1.1 \text{ mHz} \end{cases} \quad (3.14)$$

Comme le montre la figure 3.17, le repérage de ces deux fréquences sur la projection du plan de Ragone confirme clairement la compatibilité entre la mission $P_{BT}(t)$ et le stockage électrochimique d'une part, et la mission $P_{SC}(t)$ et le stockage capacitif d'autre part.

3.3.4 Conclusion

Dans cette section, nous avons présenté le principe de la gestion énergétique fréquentielle basé sur les caractéristiques intrinsèques des sources d'énergie et de puissance. En croisant une vision fréquentielle des sources – telle qu'elle se déduit par projection du plan de Ragone – et une vision fréquentielle des missions, la gestion fréquentielle assure la compatibilité entre chaque élément de stockage et la part de mission qui lui est destinée. Elle permet aussi l'optimisation de l'efficacité énergétique et de la pollution en sollicitant,

⁽¹⁾Le calcul de la courbe de variation de l'énergie associée à une courbe de puissance est une simple intégrale.

Nous explicitons ce calcul plus bas, à la section §3.5.1, page 71

⁽²⁾C'est plus de la concentration des cycles qu'il est question.

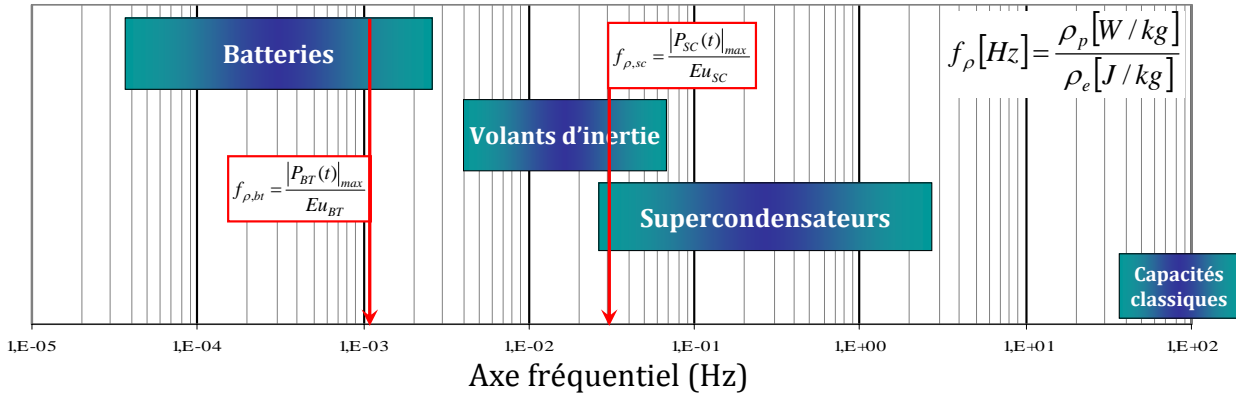


Fig. 3.17: Compatibilité entre parts de mission et sources

en permanence, le groupe Diesel à sa puissance nominale. Le chapitre 4, consacré à l'analyse des configurations possibles, revient plus largement sur les avantages de la gestion fréquentielle.

3.4 Modelès en flux de puissance pour la synthèse énergétique

La modélisation en flux de puissance est un moyen efficace permettant de simplifier au maximum le processus de dimensionnement énergétique de la locomotive hybride. Il permet de dimensionner les sources d'énergie sans se préoccuper, ni de la disposition en série ou en parallèle des cellules de batteries et de supercondensateurs, ni de la complexité électrique de ces éléments. Comme le montre la figure 3.18, le modèle en flux de puissance de la locomotive est basé sur un bilan de puissance détaillé prenant en considération les pertes énergétiques du système. Les éléments intervenant dans ce bilan de puissance sont la mission constituée des moteurs de traction et des auxiliaires, le groupe Diesel, le pack de batteries et le pack de supercondensateurs. Le bilan de puissance au nœud énergétique⁽¹⁾ s'écrit :

$$P = P_{GE} + P_{BT} + P_{SC} \quad (3.15)$$

La mission se réduit à la simple donnée de la puissance enregistrée $P(t)$. Cette puissance intègre a priori les pertes dans les convertisseurs de traction, les convertisseurs des auxiliaires, les moteurs de traction et les transmissions mécaniques. Nous détaillons les autres éléments du modèle dans les sous-sections qui suivent.

⁽¹⁾Le nœud énergétique est le point de rencontre des flux de puissance assignés par la gestion à chacune des sources. C'est la traduction symbolique du bus de tension de l'architecture électrique de la locomotive (figure 3.2)

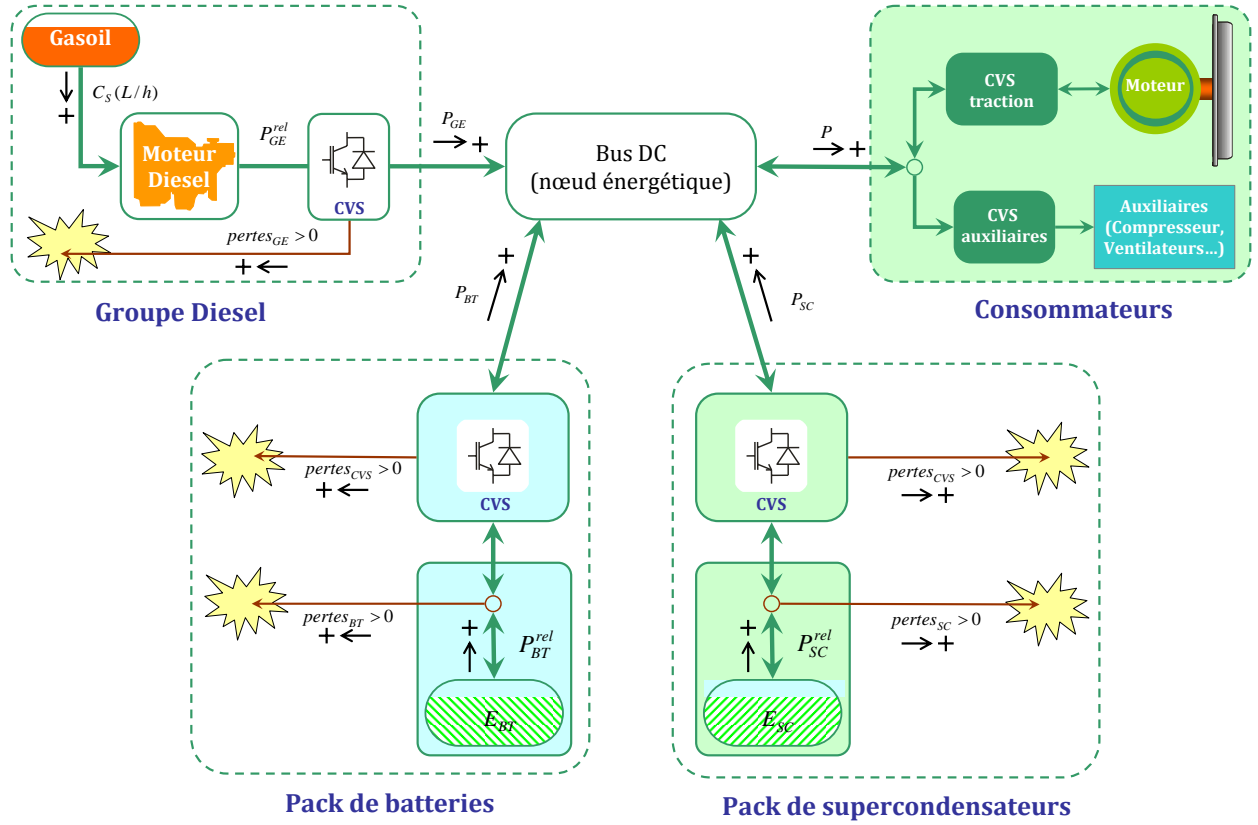


Fig. 3.18: Bilan de puissance de la locomotive hybride

3.4.1 Groupe Diesel

Le groupe Diesel est modélisé comme un transformateur qui traduit, en débit de fuel C_s (consommation spécifique) exprimé en litre par heure, la puissance en sortie P_{GE} . La cartographie de cette relation est établie à l'aide d'essais et intègre donc l'ensemble des pertes énergétiques dans le moteur thermique et l'alternateur. Le rendement du redresseur (commandé ou non) est le seul dont il sera tenu compte dans le modèle du groupe Diesel. La puissance réellement "consommante" P_{GE}^{rel} s'écrit :

$$P_{GE}^{rel} = P_{GE} + \text{pertes}_{GE} \quad (3.16)$$

En introduisant un rendement moyen rd_{GE} qui représente essentiellement les pertes dans le redresseur en aval de l'alternateur du groupe, nous pouvons écrire :

$$P_{GE} = rd_{GE} \cdot P_{GE}^{rel} \quad (3.17)$$

Soit :

$$\text{pertes}_{GE} = \left(\frac{1}{rd_{GE}} - 1 \right) \cdot P_{GE} \quad (3.18)$$

Globalement, nous considérons un rendement moyen entre 94% et 97% pour les convertisseurs statiques. 94% pour les convertisseurs à découpage et 97% pour les redresseurs à diodes. Nous avons préconisé un redressement non commandé pour le groupe Diesel donc

rd_{GE} vaut approximativement 97%. La consommation est calculée à partir de la puissance consommante P_{GE}^{rel} . Nous reviendrons plus largement sur le calcul de la consommation de gasoil au chapitre 4.

3.4.2 Batteries et supercondensateurs

Rappelons la convention de signe relative aux puissances des éléments de stockage. Comme le montre la figure 3.18, le signe positif correspond à la décharge et le signe négatif à la charge⁽¹⁾. Sauf mention contraire, cette convention est adoptée dans l'ensemble de ce rapport. Les pertes énergétiques sont toujours positives et peuvent se déduire, selon les cas, de la puissance fournie par le reste du système au dispositif de stockage ou de la puissance délivrée par le dispositif de stockage.

Dans le modèle en flux de puissance, les deux dispositifs de stockage batteries et supercondensateurs ont des structures identiques. Nous ne discutons donc que du pack de batteries. Néanmoins, les équations concernant le pack de supercondensateurs sont listées. Deux types de pertes énergétiques interviennent entre la mission vue du nœud énergétique (P_{BT}) et la puissance réellement intégrée⁽²⁾ P_{BT}^{rel} . Il s'agit notamment des pertes dans les convertisseurs statiques (pertes_{CVS}), des pertes joules dans les résistances série des cellules (pertes_{BT}). Nous n'impliquons pas le phénomène d'auto-décharge dans le modèle de dimensionnement pour une raison simple : l'auto-décharge n'a aucun effet direct sur les flux de puissance. Mais c'est plutôt un phénomène perceptible dans la durée. De fait, il a une importance relativement faible dans un contexte d'hybridation où les cycles de charges et de décharges sont assez rapprochés. D'après la convention de signe, le bilan de puissance s'écrit :

$$P_{BT}^{rel} = P_{BT} + \text{pertes}_{CVS} + \text{pertes}_{BT} \quad (3.19)$$

En introduisant un rendement moyen rd_{BT} qui représente l'ensemble des pertes du pack, nous pouvons écrire :

$$P_{BT}^{rel} = \begin{cases} \frac{1}{rd_{BT}} \cdot P_{BT} & \text{si } P_{BT} \geq 0 \text{ (décharge)} \\ rd_{BT} \cdot P_{BT} & \text{si } P_{BT} < 0 \text{ (charge)} \end{cases} \quad (3.20)$$

Ce qui donne :

$$\text{pertes}_{CVS} + \text{pertes}_{BT} = \begin{cases} \left(\frac{1}{rd_{BT}} - 1 \right) \cdot P_{BT} & \text{si } P_{BT} \geq 0 \text{ (décharge)} \\ (rd_{BT} - 1) \cdot P_{BT} & \text{si } P_{BT} < 0 \text{ (charge)} \end{cases} \quad (3.21)$$

Le rendement moyen rd_{BT} ⁽³⁾ est en fait le produit du rendement du convertisseur DC/DC (à découpage) et du rendement de la batterie. Nous fixons le rendement du convertisseur à

⁽¹⁾Convention signe générateur.

⁽²⁾La puissance réellement transformée en énergie

⁽³⁾Notons que cette notion de rendement, propre au modèle en flux de puissance, est approximative car les pertes pertes_{CVS} et pertes_{BT} varient en pratique selon des proportions assez différentes. Cette approximation sera affinée dans les modèles d'analyse du chapitre 4, mais reste suffisante à ce stade du processus de conception.

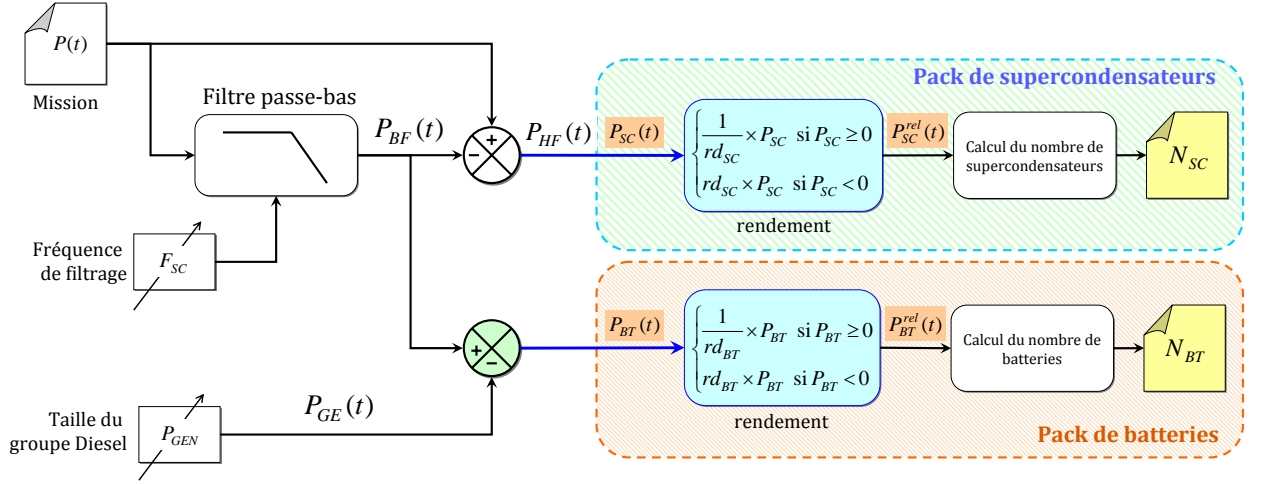


Fig. 3.19: Modèle de synthèse en flux de puissance avec prise en compte des pertes

94% et celui de la batterie à 85% [3]. Le rendement rd_{BT} vaut alors 80%. Ces chiffres sont difficilement justifiables car le rendement varie selon les constructeurs et les technologies. Dans le cas présent, nous avons choisi un rendement de 85% pour la cellule NiCd, sur la base des informations que nous a fournies Hoppecke.

Pour ce qui concerne les supercondensateurs, le rendement de l'élément est de 95%, donc le rendement moyen du pack de supercondensateurs rd_{SC} vaut 91%. Nous retenons, à l'instar du pack de batteries (Eq.3.19, Eq.3.20 et Eq.3.21), les relations suivantes :

$$P_{SC}^{rel} = P_{SC} + pertes_{CVS} + pertes_{SC} \quad (3.22)$$

$$P_{SC}^{rel} = \begin{cases} \frac{1}{rd_{SC}} \cdot P_{SC} & \text{si } P_{SC} \geq 0 \text{ (décharge)} \\ rd_{SC} \cdot P_{SC} & \text{si } P_{SC} < 0 \text{ (charge)} \end{cases} \quad (3.23)$$

$$pertes_{CVS} + pertes_{SC} = \begin{cases} \left(\frac{1}{rd_{SC}} - 1 \right) \cdot P_{SC} & \text{si } P_{SC} \geq 0 \text{ (décharge)} \\ (rd_{SC} - 1) \cdot P_{SC} & \text{si } P_{SC} < 0 \text{ (charge)} \end{cases} \quad (3.24)$$

Le modèle de synthèse en flux de puissance, intégrant les pertes énergétiques, est donné à la figure 3.19. La figure 3.20 montre les missions vues par le nœud énergétique et les missions réellement transformées en énergie. Le bon rendement du pack de supercondensateurs fait que la puissance P_{SC} , vue par le nœud énergétique se confond presque avec la puissance réellement transformée en énergie capacitive P_{SC}^{rel} . Concernant le pack de batteries, la différence entre $P_{BT}(t)$ et $P_{BT}^{rel}(t)$ est nette. Les pertes dans les convertisseurs ajoutées au rendement relativement faible⁽¹⁾, font que la courbe de la puissance réelle $P_{BT}^{rel}(t)$ est très détachée de la puissance P_{BT} vue par le nœud énergétique.

⁽¹⁾85% est un excellent rendement certes, mais comparativement au 95% des supercondensateurs, nous pouvons parler de rendement relativement faible.

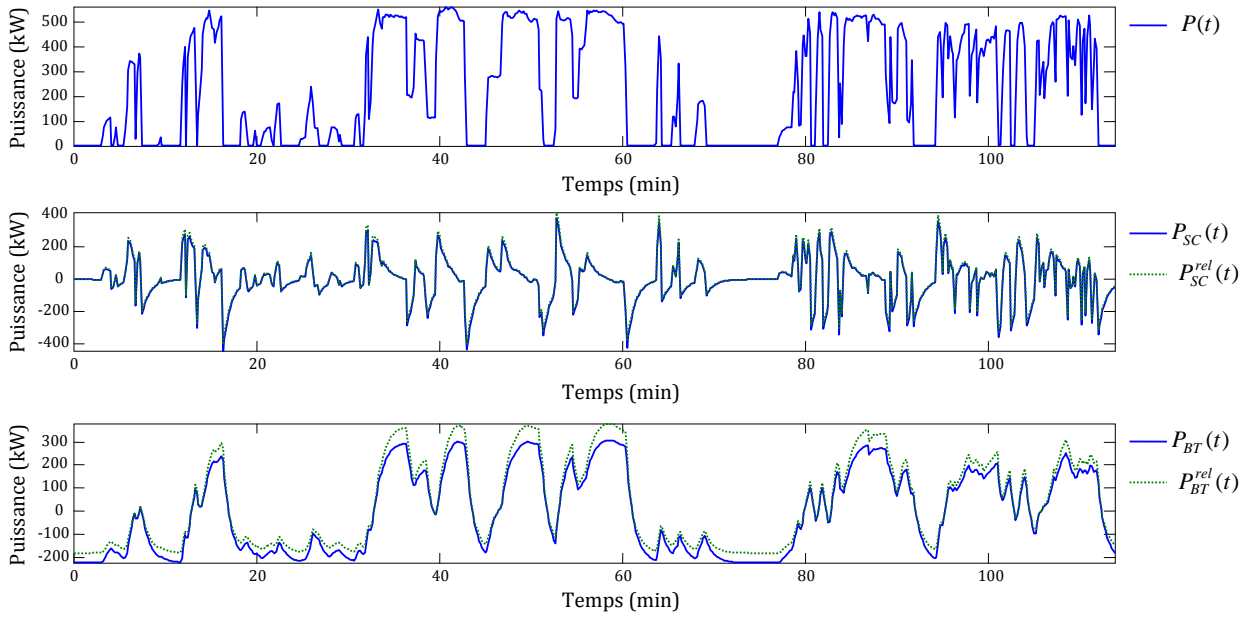


Fig. 3.20: Prise en compte des pertes énergétiques dans la chaîne de stockage

3.4.3 Conclusion

Dans cette section, nous avons présenté le modèle de synthèse en flux de puissance de la locomotive hybride. Ce modèle est complet car il est basé sur un bilan de puissance complet et rigoureux. Le phénomène d'auto-décharge, perceptible dans la durée, n'a aucun effet immédiat sur les flux de puissance, ce qui nous permet de négliger son implication dans le modèle de dimensionnement énergétique. Les puissances réelles ayant servi au dimensionnement des éléments de stockage sont les puissances P_{SC}^{rel} et P_{BT}^{rel} obtenues après application des rendements des différents éléments traversés par les flux de puissance.

Deux entrées (paramètres de la stratégie de gestion) permettent de balayer les configurations possibles : il s'agit de la puissance nominale du groupe Diesel P_{GEN} et de la fréquence de filtrage F_{SC} . Comme nous l'avons souligné plus haut, le choix de la fréquence de filtrage suffit pour déterminer la mission du pack de supercondensateurs et donc son dimensionnement. Le dimensionnement des batteries dépend par contre à la fois de la fréquence de filtrage F_{SC} et de la puissance nominale du groupe Diesel P_{GEN} .

3.5 Dimensionnement du pack de supercondensateurs

Les supercondensateurs admettent la même limitation de puissance en charge qu'en décharge, ce qui constitue un avantage par rapport aux batteries. En faisant varier la fréquence de filtrage F_{SC} , nous modifions directement la mission du pack de supercondensateurs et donc son dimensionnement. Nous établissons ainsi un tableau de correspondance entre la fréquence de filtrage et le nombre N_{SC} de supercondensateurs à embarquer.

Dans cette section, nous abordons le dimensionnement du pack capacitif. Dans la sous-section 3.5.1), nous abordons le calcul des caractéristiques dimensionnantes, à partir de la mission de puissance destinée au pack capacitif. Dans la sous-section 3.5.2, nous montrons en premier lieu l'effet surdimensionnant des pertes énergétiques, puis nous proposons une technique de compensation qui permet d'optimiser le dimensionnement des supercondensateurs. Le dimensionnement du pack capacitif est présenté à la sous-section 3.5.3, puis l'analyse des résultats obtenus pour le démonstrateur LHyDIE est proposée à la sous-section 3.5.4. La dernière sous-section (§3.5.5) vient conclure le dimensionnement des supercondensateurs.

3.5.1 Puissance et énergie dimensionnantes

Nous savons maintenant que la puissance réellement transformée en énergie est la mission P_{SC}^{rel} . L'étape suivante consiste à déterminer l'évolution du niveau d'énergie dans le pack capacitif.

$$E_{SC}(t) = - \int_0^t P_{SC}^{rel}(\tau) d\tau \quad (\text{convention décharge positive charge négative}) \quad (3.25)$$

$E_{SC}(t)$ représente une valeur indifféremment positive ou négative, car il s'agit d'une valeur relative du niveau de l'énergie stockée et non d'une quantité réelle d'énergie. La différence entre les extrema positif et négatif de $E_{SC}(t)$ donne l'énergie utile nécessaire à la mission.

$$Eu_{SC} = \max_t(E_{SC}(t)) - \min_t(E_{SC}(t)) \quad (3.26)$$

Mais l'énergie utile Eu_{SC} ne représente pas la capacité totale de stockage du pack. En effet, pour une utilisation optimale⁽¹⁾, il convient d'utiliser le pack de supercondensateurs entre 25% et 100% de sa capacité totale de stockage. Ce qui correspond à une profondeur de décharge de 75%. Généralement, la profondeur de décharge est désignée par DoD_{SC} signifiant en anglais "depth of discharge". La capacité totale de stockage du pack est alors donnée par :

$$Etot_{SC} = \frac{Eu_{SC}}{DoD_{SC}} \quad (3.27)$$

En plus de cette capacité totale de stockage dont doit disposer le pack de supercondensateurs, il y a aussi la puissance maximale imposée par la mission, qui intervient dans le dimensionnement du pack. Elle est donnée par :

$$P_{scmax} = \max_t(|P_{SC}(t)|) \quad (3.28)$$

Le dimensionnement du pack de supercondensateurs consiste donc à déterminer le nombre N_{SC} de supercondensateurs qu'il faut pour stocker une quantité $Etot_{SC}$ d'énergie et pour délivrer une puissance maximale de P_{scmax} .

⁽¹⁾Optimale au sens de la durée de vie, mais aussi pour une variation restreinte de la tension du pack $\Delta V \leq 50\%$.

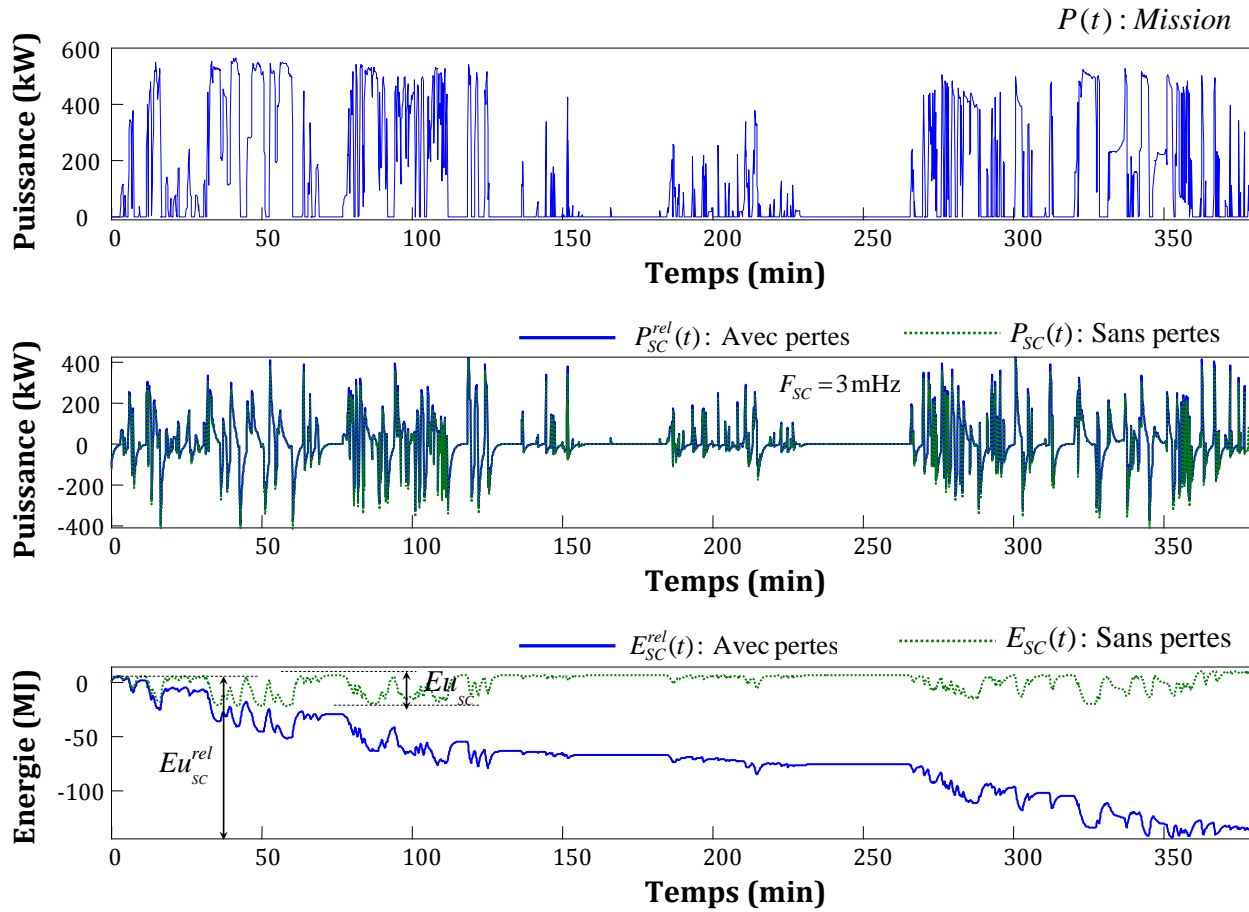


Fig. 3.21: Effet des pertes énergétiques sur le dimensionnement des supercondensateurs

3.5.2 Compensation des pertes énergétiques

Malgré le bon rendement de la chaîne de stockage capacitive, les pertes énergétiques constituent un handicap significatif au dimensionnement et à l'utilisation optimale des supercondensateurs [41]. Afin de bien mettre en évidence l'effet des pertes énergétiques sur l'utilisation des supercondensateurs, nous avons choisi une mission réelle d'assez longue durée (6 h30 min).

La figure 3.21 montre l'évolution du niveau d'énergie dans le pack capacitif. Nous distinguons deux cas séparés. La première courbe du niveau relatif de l'énergie stockée est obtenue avec la puissance P_{SC} donc sans les pertes. La deuxième vient de l'intégration de $P_{SC}^{rel(1)}$ donc avec les pertes. Nous observons qu'en présence des pertes, l'énergie stockée, en plus de sa variation rapide au rythme de la dynamique de la mission, subit une chute progressive à mesure que la mission dure. Nous enregistrons un surdimensionnement d'environ quatre fois, dû à la prise en compte des pertes : $Eu_{SC}^{rel} > 4 \times Eu_{SC}$. Nous proposons dans le paragraphe suivant une explication à ce phénomène.

En effet, l'écart entre $E_{SC}^{rel}(t)$ et $E_{SC}(t)$ s'explique par l'accumulation des pertes en charge et en décharge, qui se déduisent implicitement de la réserve d'énergie du pack et entraînent

⁽¹⁾Le symbole "rel" signifie réel c'est-à-dire avec les pertes et non relatif.

la chute progressive⁽¹⁾ de son état de charge. Essayons d'établir une relation mathématique entre $E_{SC}^{rel}(t)$ et $E_{SC}(t)$.

Rappelons l'équation Eq.3.22 liant $P_{SC}(t)$ et $P_{SC}^{rel}(t)$.

$$P_{SC}^{rel}(t) = P_{SC}(t) + \underbrace{\text{pertes}_{CVS}(t) + \text{pertes}_{SC}(t)}_{|p^+(t)| \geq 0} \quad (3.29)$$

En introduisant le calcul des intégrales et en mettant en évidence le fait que les pertes sont toujours positives, nous avons :

$$\int_0^t P_{SC}^{rel}(\tau) d\tau = \int_0^t P_{SC}(\tau) d\tau + \int_0^t |p^+(\tau)| d\tau \quad (3.30)$$

Soit, d'après la définition Eq.3.25 :

$$\underbrace{-\int_0^t P_{SC}^{rel}(\tau) d\tau}_{E_{SC}^{rel}(t)} = -\underbrace{\int_0^t P_{SC}(\tau) d\tau}_{E_{SC}(t)} - \underbrace{\int_0^t |\text{pertes}(\tau)| d\tau}_{e^+(t)} \quad (3.31)$$

Ou plus simplement :

$$E_{SC}^{rel}(t) = E_{SC}(t) - e^+(t) \quad (3.32)$$

Notons que la fonction $e^+(t)$ est l'intégrale d'une quantité positive, donc une fonction croissante du temps. L'équation Eq.3.32 justifie pleinement l'observation du phénomène de la figure 3.21 : l'écart entre $E_{SC}^{rel}(t)$ et $E_{SC}(t)$ se creuse à mesure que la mission dure. Par exemple, avec le rendement moyen de la chaîne fixé à 91%, à chaque cycle de charge et décharge complet, le déficit énergétique est de $2 \times 9\%$, au bout de 50 cycles (ce qui est courant sur une mission journalière), le déficit monte à 180%.

Pour remédier au problème de chute de l'énergie stockée, consécutive aux pertes énergétiques, nous proposons de compenser ces pertes. Il convient tout de même de prendre quelques précautions. En effet, d'après le principe de gestion fréquentielle, chacune des sources doit intervenir dans un domaine de fréquence déterminé. Or, les pertes énergétiques, d'après l'équation Eq.3.24 sont proportionnelles à la mission de puissance P_{SC} et sont donc du domaine fréquentiel supérieur. Faire fournir la compensation des pertes, directement par les batteries et le groupe Diesel, reviendrait à violer le principe du "respect" des domaines fréquentiels. La figure 3.22 montre le modèle de dimensionnement énergétique étudié aux sections §3.3.2 et §3.4.2, auquel nous avons ajouté un système de compensation des pertes. La mission $P(t)$ est filtrée et séparée en deux parties : la partie P_{HF} correspond aux fréquences supérieures et la partie P_{BF} correspond aux basses fréquences.

$$\begin{cases} P_{BF}(s) = \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot F_{SC}}{2 \cdot \pi \cdot F_{SC} + s} \right) \cdot P(s) \\ P_{HF}(s) = P(s) - P_{BF}(s) = \left(\frac{s}{2 \cdot \pi \cdot F_{SC} + s} \right) \cdot P(s) \end{cases} \quad (3.33)$$

⁽¹⁾Il est très important de noter le caractère progressif de la chute de l'état de charge du pack capacitif car la solution de compensation est en partie basée sur cet aspect.

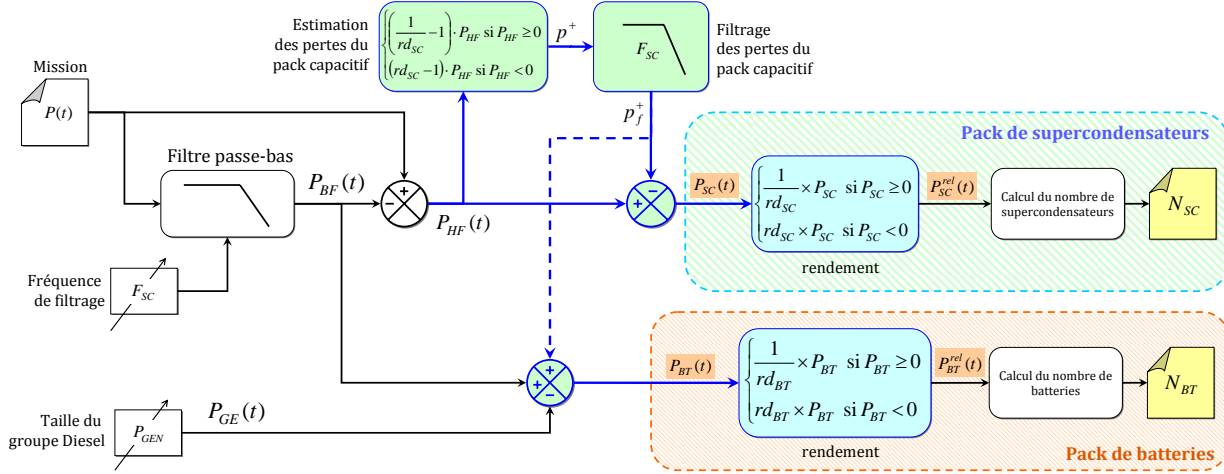


Fig. 3.22: Compensation des pertes du pack capacitif

Cette fois, contrairement à ce qui était expliqué à la section §3.3.2, la mission P_{HF} n'est pas directement dirigée vers le pack de supercondensateurs. Elle est utilisée pour estimer les pertes énergétiques (p^+) qu'occasionnerait son transfert à travers la chaîne de stockage capacitive.

$$p^+ = \begin{cases} \left(\frac{1}{rd_{SC}} - 1 \right) \cdot P_{SC} & \text{si } P_{SC} \geq 0 \text{ (décharge)} \\ (rd_{SC} - 1) \cdot P_{SC} & \text{si } P_{SC} < 0 \text{ (charge)} \end{cases} \quad (3.34)$$

Ces pertes p^+ sont ramenées dans le domaine fréquentiel des batteries et du groupe Diesel, par un filtre passe-bas, afin de respecter le principe de base de la gestion fréquentielle.

$$p_f^+(s) = \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot F_{SC}}{2 \cdot \pi \cdot F_{SC} + s} \right) \cdot p^+(s) \quad (3.35)$$

Les pertes filtrées p_f^+ sont ensuite déduites de la mission des supercondensateurs : c'est la compensation. Puis elles sont rajoutées à la mission des batteries et du groupe Diesel pour que le bilan de puissance soit juste.

$$\begin{cases} P_{GE}(s) = P_{GEN} \\ P_{SC}(s) = P_{HF}(s) - p_f^+ \\ P_{BT}(s) = P_{BF}(s) - P_{GEN} + p_f^+ \end{cases} \quad (3.36)$$

Les résultats de simulation de ce nouveau modèle en flux de puissance sont montrés à la figure 3.23. La simulation a été faite dans les mêmes conditions que celle de la figure 3.21. Nous observons que les pertes p^+ sont effectivement du même domaine fréquentiel que la mission des supercondensateurs. Le filtrage a permis d'adoucir ces pertes avant de les compenser. En comparaison à la courbe d'énergie $E_{SC}^{rel}(t)$ obtenue sans la compensation des pertes (figure 3.21, page 72), nous observons cette fois (figure 3.23) un redressement de la courbe d'énergie $E_{SC}^{rel}(t)$. Il s'ensuit une optimisation de l'énergie utile et donc de la capacité totale de stockage. L'énergie utile, dans les mêmes conditions de simulation,

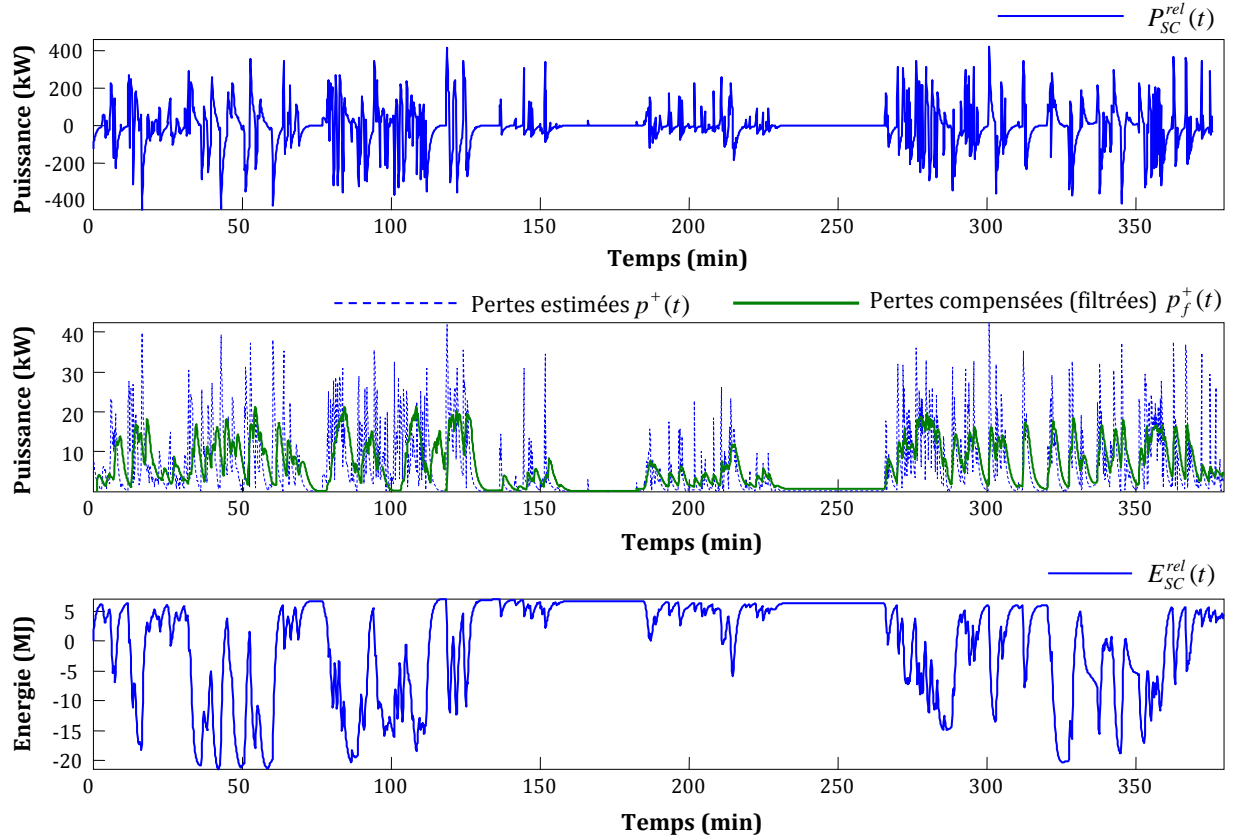


Fig. 3.23: Compensation des pertes et optimisation du pack capacitif

est passée de 150 MJ (41.7 kWh) en absence de compensation, à 22 MJ (6.1 kWh) avec la compensation.

En conclusion, nous avons mis en évidence, dans cette sous-section, le fait que des pertes énergétiques de la chaîne de stockage capacitive entraînent un surdimensionnement trop large (4 fois plus dans l'exemple de la mission de 6 h30 min étudiée). Nous avons mis en œuvre la compensation de ces pertes, sans violer le principe de base de gestion fréquentielle, et obtenu une optimisation de la capacité totale de stockage du pack capacitif.

3.5.3 Dimensionnement du pack capacitif

Dans les sous-sections précédentes, nous avons procédé au calcul des paramètres dimensionnants E_{tot_SC} et P_{scmax} . Dans cette sous-section, nous allons mettre en œuvre le calcul du nombre de cellules de supercondensateurs nécessaire pour satisfaire ces paramètres.

Dans le cadre de ce projet, une étude préalable sur l'état de l'art des supercondensateurs a permis d'identifier un élément intéressant. Il s'agit du supercondensateur B49410B2506Q000 (5000 F/2.5 V) fabriqué par EPCOS. Les caractéristiques complètes de ce supercondensateur sont données à l'annexe C.3. Le tableau 3.1 est un extrait simplifié de la fiche technique de cet élément. L'énergie totale que peut stocker cet élément est donnée par :

Tab. 3.1: Extraits des caractéristiques du supercondensateur EPCOS 5000 F/2.5 V

Capacité C_R (Rated capacitance)	5000	F
Tension nominale V_R (Rated Voltage)	2.5	V
Résistance série ESR_{DC} (element series resistance)	350	$\mu\Omega$

$$E_{SC}^0 = \frac{1}{2} \times C_R \times V_R^2 \quad \text{soit :} \quad E_{SC}^0 = 15.625 \text{ kJ} \quad (3.37)$$

D'après les spécifications du fabricant (cf. §C.3), la puissance maximale disponible par élément est donnée par la relation :

$$P_{SC}^0 = \frac{0.12 \times V_R^2}{ESR_{DC}} \quad \text{soit :} \quad P_{SC}^0 = 2.142 \text{ kW} \quad (3.38)$$

La puissance et l'énergie étant des grandeurs sommables⁽¹⁾, un pack de N_{SC} éléments est caractérisé par :

$$\begin{cases} P_{SC}^{pack} = N_{SC} \times P_{SC}^0 \\ E_{SC}^{pack} = N_{SC} \times E_{SC}^0 \end{cases} \quad (3.39)$$

Pour que les N_{SC} éléments satisfassent à la mission caractérisée par (E_{totSC} et P_{scmax}), il faut que les conditions suivantes soient respectées :

$$\begin{cases} P_{SC}^{pack} \geq P_{scmax} \\ E_{SC}^{pack} \geq E_{totSC} \end{cases} \quad (3.40)$$

Soit, d'après l'équation Eq.3.31 :

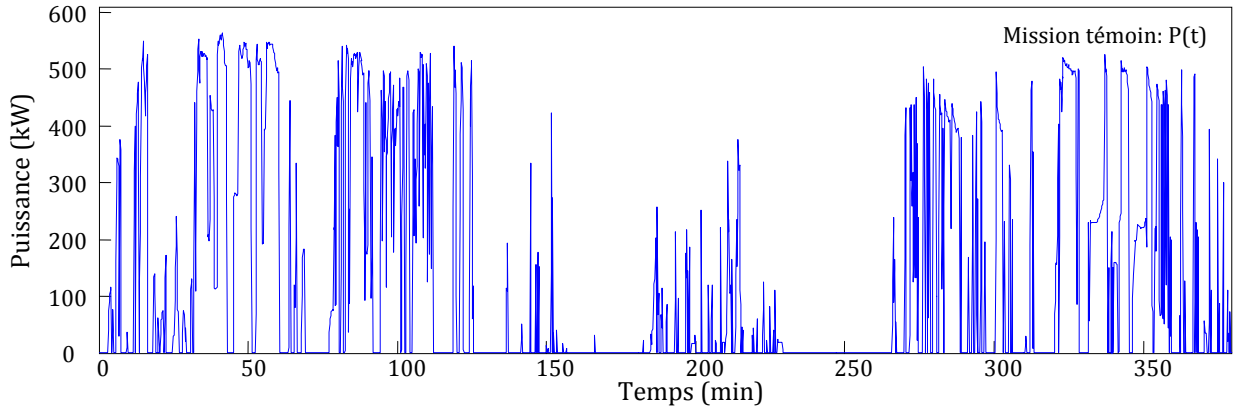
$$\begin{cases} N_{SC} \times P_{SC}^0 \geq P_{scmax} \\ N_{SC} \times E_{SC}^0 \geq E_{totSC} \end{cases} \quad (3.41)$$

Ou plus simplement :

$$N_{SC} \geq \max \left(\frac{P_{scmax}}{P_{SC}^0}, \frac{E_{totSC}}{E_{SC}^0} \right) \quad (3.42)$$

Dans cette dernière équation, les contraintes de puissance et d'énergie sont simultanément prises en compte. Nous allons montrer sur un exemple de mission réelle que cette précaution est indispensable. Pour cela, considérons la mission de la figure 3.24a. Pour différentes valeurs de la fréquence de filtrage F_{SC} , nous estimons la capacité totale de stockage nécessaire E_{totSC} et la puissance crête P_{scmax} imposée au pack de supercondensateurs. Nous introduisons la notion de butée de puissance. La butée de puissance $P_{butée}$ correspondant à la puissance limite que peut offrir un pack de capacité totale de stockage E_{totSC} . La

⁽¹⁾Au sens mathématique du terme



(a) Mission de test

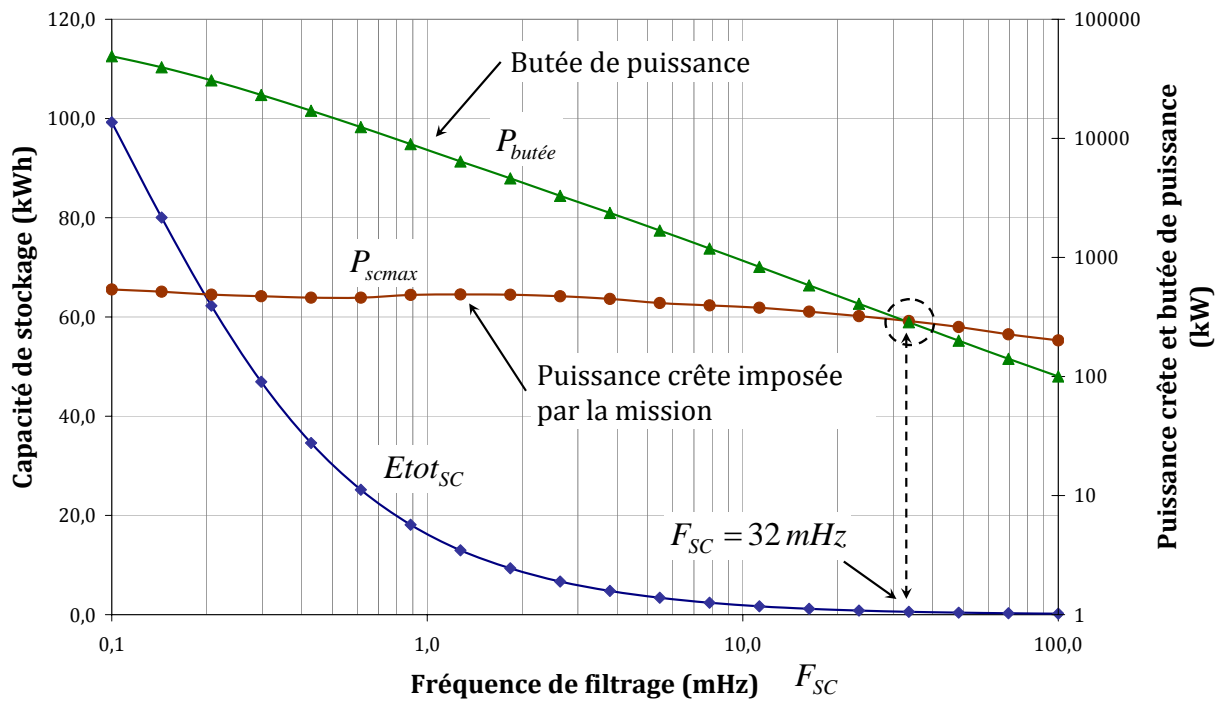
(b) $E_{tot_{SC}}$, P_{scmax} et $P_{butée}$ en fonction de F_{SC}

Fig. 3.24: Prise en compte simultanée des contraintes de puissance et d'énergie.

relation $P_{butée} \Rightarrow E_{tot_{SC}}$ est basée sur une simple "règle de trois". Un unique supercondensateur offre P_{SC}^0 en puissance et E_{SC}^0 en énergie, la butée de puissance d'un pack offrant $E_{tot_{SC}}$ d'énergie s'écrit alors :

$$P_{butée} = \frac{E_{tot_{SC}} \times P_{SC}^0}{E_{SC}^0} \quad (3.43)$$

Nous avons tracé ces trois caractéristiques en fonction de la fréquence de filtrage, à la figure 3.24b.

Nous observons que pour les fréquences F_{SC} allant de 0.1 mHz à 32 mHz, la butée de puissance $P_{butée}$ est largement supérieure à la puissance crête P_{scmax} imposée par la mission. Dans cette gamme de fréquence, c'est donc la capacité de stockage $E_{tot_{SC}}$ qui est dimensionnante. Par contre, pour les fréquences F_{SC} supérieures à 32 mHz, la butée de puissance

passé en dessous de la puissance crête imposée par la mission et c'est alors cette dernière qui est dimensionnante. D'où la prise en compte simultanée des contraintes de puissance et d'énergie dans l'équation Eq.3.42.

3.5.4 Analyse du dimensionnement du pack capacitif

Nous avons réitéré le calcul du nombre de supercondensateurs, tel que formulé par l'équation Eq.3.34, pour chacune des quinze missions spécifiées pour LHyDIE. La figure 3.25 montre le résultat de ces calculs. Remarquons que, pour toutes les missions, le nombre de supercondensateurs augmente de façon exponentielle⁽¹⁾ à mesure que la fréquence de filtrage diminue. En effet, réduire la fréquence de filtrage revient à grossir le contenu énergétique de la mission du pack capacitif et donc le nombre d'éléments. Nous observons également que les courbes $N_{SC}(F_{SC})$ se différencient assez nettement d'une mission à l'autre. Ainsi, comme le montre la figure 3.25, pour la valeur de la fréquence de filtrage fixée à 20 mHz, le nombre de supercondensateurs varie de 100 à 500 selon la mission. De même, pour le nombre de supercondensateurs fixé à 500 éléments, la fréquence de filtrage varie de 2 à 20 mHz selon la mission. Cette observation nous a permis de développer le contrôle auto-adaptatif de la fréquence de filtrage présenté au chapitre 5. En effet, une fois le dimensionnement du pack figé, il convient d'optimiser l'utilisation des supercondensateurs en adaptant la fréquence selon les missions.

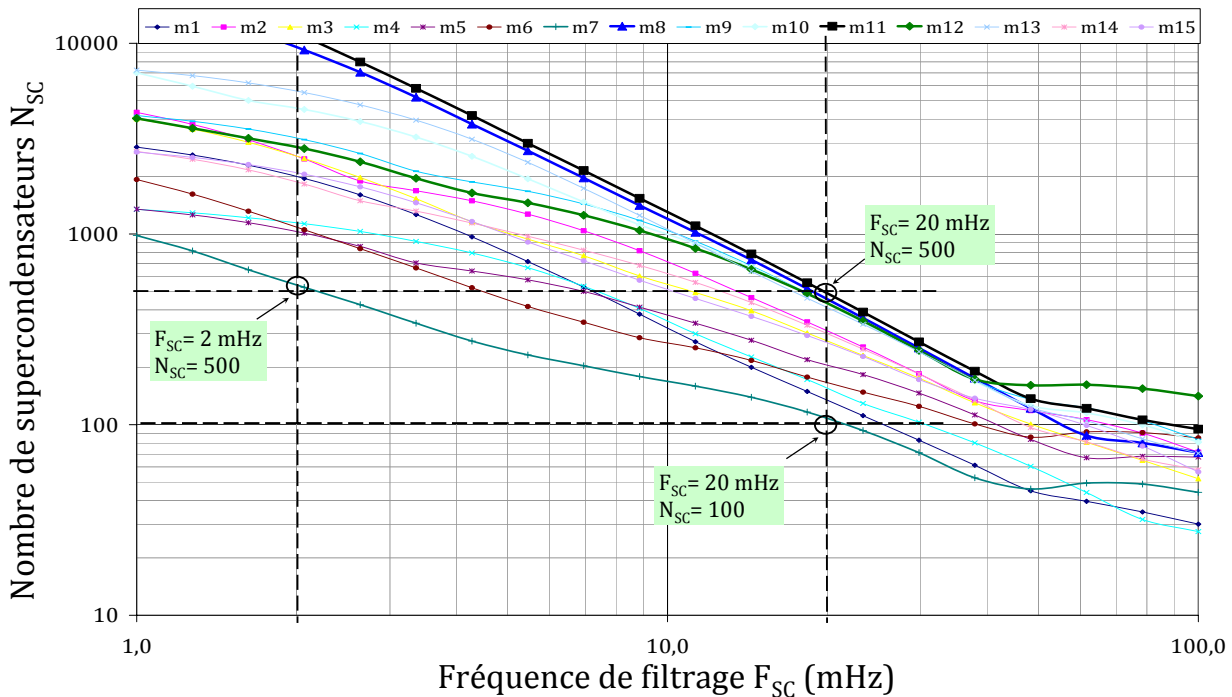


Fig. 3.25: Dimensionnement du pack capacitif pour chacune des missions

⁽¹⁾Sur la figure, les courbes sont pratiquement linéaires, mais les axes sont à l'échelle logarithmique.

3.5.5 Conclusion

Dans cette section, nous avons présenté de façon complète le dimensionnement des supercondensateurs. Nous avons notamment présenté le calcul de la capacité totale de stockage du pack de supercondensateurs à partir de sa mission de puissance, la compensation des pertes énergétiques de la chaîne de stockage capacitive pour un dimensionnement optimal. Nous avons aussi procédé au dimensionnement du pack capacitif pour les différentes missions spécifiées dans le cahier des charges. Ce dimensionnement nous a permis d'observer une grande disparité entre les missions. Nous avons retenu pour la suite, qu'une fois le dimensionnement fait, il faudra ajuster la fréquence de filtrage selon les missions pour optimiser l'utilisation du pack de supercapacités.

3.6 Dimensionnement du pack de batteries

Le dimensionnement des batteries est très différent de celui des supercondensateurs sur plusieurs aspects. En effet, les batteries, contrairement aux supercondensateurs, n'admettent pas les mêmes limitations de courant en charge qu'en décharge. La prise en compte de cette particularité constitue une difficulté supplémentaire dans le processus de dimensionnement des batteries. A contrario des supercondensateurs, la question de la compensation des pertes énergétiques est complètement transparente dans le processus de dimensionnement des batteries. En effet, la gestion fréquentielle vise par principe à maintenir les batteries au niveau de charge le plus élevé possible. Cela se fait implicitement par le maintien, le plus souvent possible, du groupe Diesel à son régime nominal⁽¹⁾. De fait, la compensation des pertes du pack électrochimique n'est pas nécessaire⁽²⁾.

Dans cette section, nous abordons le dimensionnement du pack électrochimique. Dans une sous-section introductive (§3.6.1), nous rappelons, en référence à la nouvelle approche de la classification et de la caractérisation des missions ferroviaires proposée à la section 2.4.3 (page 46), les deux missions les plus "sévères" du cahier des charges. L'objectif de ce rappel est de montrer, à travers le dimensionnement des batteries, le bien fondé de cette approche. Ensuite, dans cette même sous-section introductive, nous explicitons la synthèse de la mission du pack de batteries, avec la prise en compte des pertes et la compensation de celles du pack capacitif. Dans la sous-section 3.6.2, nous proposons un balisage dans le plan énergie – puissance des zones de dimensionnement valides, sur la base des limites technologiques inhérentes aux accumulateurs électrochimiques. Dans la sous-section 3.6.3, nous abordons, comme pour les supercondensateurs, le calcul de la capacité totale de stockage du pack de batteries, à partir de la mission destinée à ce dernier. Le couplage des limites technologiques et des besoins en énergie, permet de générer

⁽¹⁾La question de la participation du groupe Diesel sera clarifiée plus loin dans ce rapport. En réalité, le groupe ne peut pas toujours rester à son régime nominal. Lorsque les batteries sont pleines et que la mission est faible (voire nulle), le groupe ne peut que tourner au ralenti ou être éteint. La mission du groupe Diesel n'est véritablement connue qu'après le dimensionnement des batteries.

⁽²⁾Attention, nous ne compensons pas les pertes comme pour les supercondensateurs certes, mais elles sont prises en compte dans la mission du pack de batteries et donc dans son dimensionnement

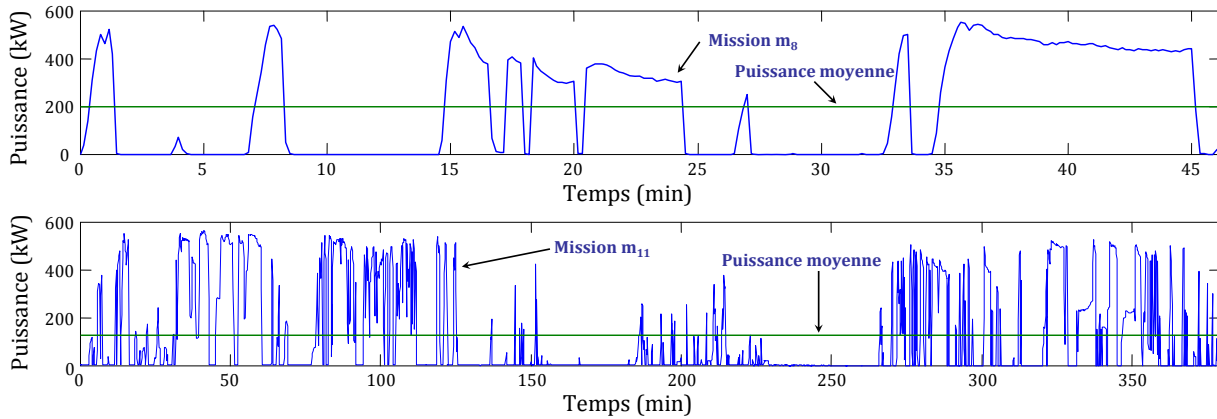


Fig. 3.26: Les deux dessertes locales dimensionnantes

le graphe de dimensionnement des batteries que nous étudions dans la sous-section 3.6.4. Les résultats du dimensionnement sont analysés dans la sous-section 3.6.5. La dernière sous-section (§3.6.6) vient conclure le dimensionnement des batteries.

3.6.1 Introduction au dimensionnement des batteries

Nous avons proposé au chapitre 2 une nouvelle approche de la notion de mission. L'application de cette approche nous a permis d'identifier sur la quinzaine de triages et de dessertes locales du cahier des charges de LHyDIÉ, deux missions dominantes m_8 et m_{11} ⁽¹⁾. L'intérêt de l'étude préalable des missions au chapitre 2 est de réduire le nombre de missions au minimum nécessaire et donc de simplifier le processus de dimensionnement de la locomotive. Néanmoins, nous pouvons recourir à l'une ou à l'ensemble des autres missions chaque fois qu'il nous semble utile, notamment pour valider la classification établie au chapitre 2 ou pour mettre en évidence les singularités d'une mission particulière. La figure 3.26 montre les deux missions dominantes (dimensionnantes). La mission m_8 est une desserte locale de 46 min qui nécessite en moyenne 200 kW. La mission m_{11} est une mission journalière de 6 h 32 min qui consomme en moyenne 125 kW.

Remarque: Afin d'éviter toute surcharge inutile, source de confusion, les notations P , P_{BT} et P_{BT}^{rel} pourraient se rapporter à une mission quelconque. En d'autres termes, nous évitons les notations comme P_{11} , $P_{BT,11}$ ou $P_{BT,11}^{rel}$ pour signifier que le calcul concerne la mission m_{11} par exemple. Nous indiquons, dès que nécessaire, la mission concernée par une valeur ou un calcul donné.

La figure 3.27 montre, pour la mission de desserte locale m_8 , l'évolution des différents flux de puissance relatifs au pack de batteries. Notons l'écart relativement important⁽²⁾ entre le flux de puissance vu depuis l'extérieur du pack (P_{BT}) et le flux de puissance réellement transformé en énergie (P_{BT}^{rel}). Cet écart est dû aux pertes énergétiques de la chaîne de stockage électrochimique (convertisseurs compris). La figure 3.27 montre aussi l'effet de la

⁽¹⁾Nous conservons dans tout ce rapport la même identification des missions qu'à l'annexe A

⁽²⁾Le rendement global du pack est estimé à 80%, donc l'écart est de 20%.

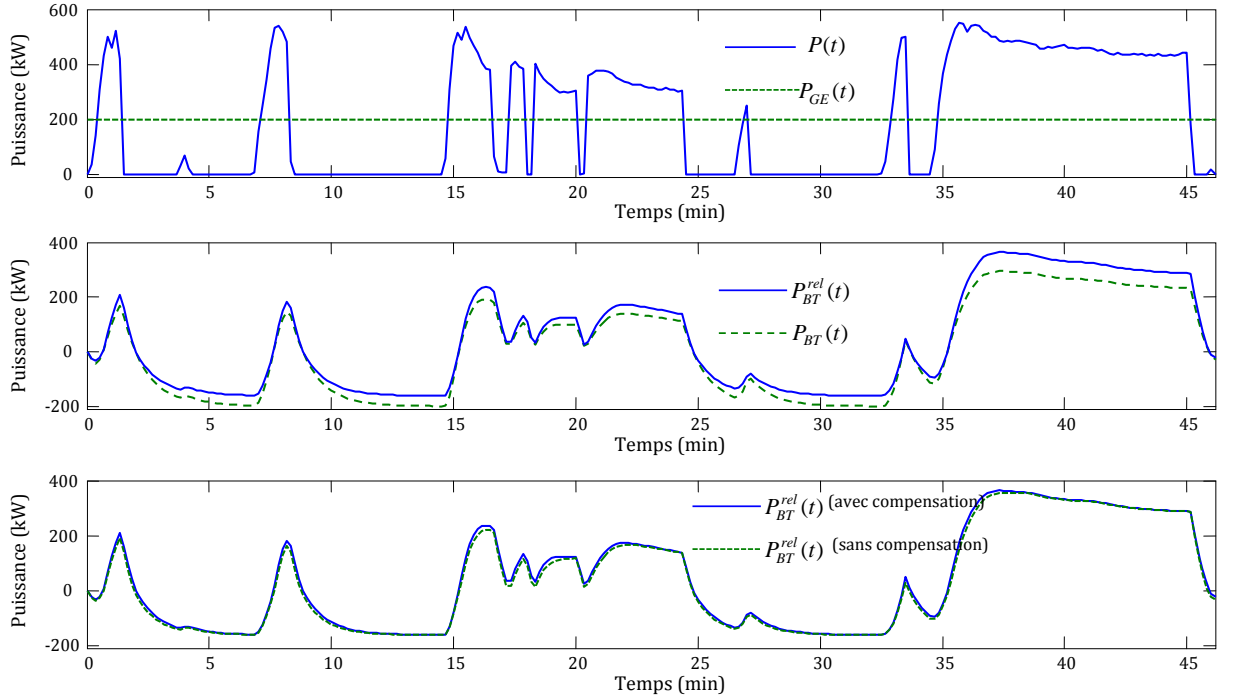


Fig. 3.27: Synthèse de la mission des batteries ($F_{SC} = 3$ mHz, $P_{GEN} = 200$ kW)

compensation des pertes du pack capacitif sur la mission de la batterie. Étant donné que le groupe Diesel est sollicité systématiquement à sa puissance nominale P_{GEN} , la compensation des pertes du pack capacitif est entièrement assurée par le pack de batteries⁽¹⁾. Ceci étant, la compensation des pertes du pack capacitif a un impact relativement limité sur la mission du pack de batteries.

Traditionnellement, les batteries sont utilisées dans des applications où c'est la capacité de stockage et le courant de décharge nominal qui importent. Le courant de charge nominal est très rarement un facteur déterminant. Mais dans une application de véhicule hybridé par du stockage, tous ces paramètres sont déterminants. De plus, il existe des couplages entre certains de ces paramètres. Le processus de dimensionnement des batteries se trouve alors bien plus complexe, dans un contexte d'hybridation, que dans une application classique. Nous proposons, dans la suite de cette section, une technique de dimensionnement qui permet de découpler les différents paramètres dimensionnants et d'optimiser le résultat du processus de dimensionnement.

3.6.2 Limites technologiques des batteries

Dans le cadre de ce projet, deux types de batteries ont été envisagées. Dans un premier temps, la SNCF a envisagé d'utiliser la cellule Ni-Zn produite par la société SCPS. Cette cellule est très intéressante pour ses excellentes caractéristiques et son faible impact environnemental (cf. Annexe C.2.2). Mais la production en série de cette technologie a

⁽¹⁾D'où l'intérêt du filtrage des pertes, pour garder la cohérence des domaines de fréquence et éviter de "brusquer" les batteries.

été retardée et n'était plus compatible avec le calendrier du projet PLATHEE. La SNCF s'est alors rabattue sur la technologie Ni-Cd dont elle a déjà une grande expérience et ce, malgré un impact écologique problématique (présence du cadmium en particulier)⁽¹⁾. Même si l'étude a été réalisée pour les deux technologies de batterie, nous n'abordons dans ce rapport que le dimensionnement du pack de batteries Ni-Cd. Les caractéristiques de la technologie Ni-Cd sont données à l'annexe C.2.1. Le tableau 3.2 est une version simplifiée de la fiche technique de cet élément. L'énergie totale que peut stocker cet élément est

Tab. 3.2: Extraits des caractéristiques de cellule FNC 1502 HR de Hoppecke

Capacité nominale C_5 (à 20°C)	135	Ah
Tension nominale V_0	1.2	V
Courant de décharge nominal I_5	27	A
Courant de charge nominal	40.5	A

donnée de façon approximative par :

$$E_{BT}^0 \approx C_5 \times V_0 \quad \text{soit :} \quad E_{BT}^0 \approx 162 \text{ Wh} \quad (3.44)$$

Les courants nominaux de décharge et de charge spécifiés sont ceux d'une utilisation "nominale". Pour un véhicule hybride, la batterie est sollicitée dans des limites plus "sévères", ce qui entraîne un vieillissement plus rapide. En accord avec la société Hoppecke, la SNCF a choisi d'utiliser les batteries dans les limites $2.5 \times C_5$ en décharge et $1 \times C_5$ en charge⁽²⁾, soit, avec la convention générateur :

$$\begin{cases} I_{dch}^0 = 2.5 \times C_5 \times h^{-1} \\ I_{ch}^0 = -1 \times C_5 \times h^{-1} \end{cases} \quad (3.45)$$

Soit $I_{dch}^0 = 337.5 \text{ A}$ et $I_{ch}^0 = -135 \text{ A}$. En faisant l'approximation de la tension constante⁽³⁾, les limitations en puissance de décharge et de charge peuvent s'écrire :

$$\begin{cases} P_{dch}^0 = I_{dch}^0 \times V_0 \\ P_{ch}^0 = -I_{ch}^0 \times V_0 \end{cases} \quad (3.46)$$

Soit $P_{dch}^0 = 405 \text{ W}$ et $P_{ch}^0 = -162 \text{ W}$.

⁽¹⁾L'hybridation de LHyDIE avec des batteries NiCd doit être vue comme une étape intermédiaire vers des couples électrochimiques plus respectueux de l'environnement, notamment le NiZn ou le Li-ion

⁽²⁾La notation $n \times C_5$ correspond normalement à une capacité (Ah), mais l'usage veut qu'il s'agisse d'un courant. La notation la plus juste devrait être $n \cdot C_5 / (1 \cdot h)$. La notation C_5 est aussi un usage des spécialistes. Elle équivaut à C

⁽³⁾La tension de la batterie varie en fonction de l'état de charge, mais cette variation est tellement faible qu'il est possible de l'assimiler à une tension constante V_0 avec une erreur relative de moins de 5% (cf. Annexe C.2.1).

Considérons une batterie dimensionnée à une capacité de stockage E_{BT} . Les contraintes technologiques imposent une limite en puissance de charge P_{ch} et de décharge P_{dch} . Nous allons introduire deux variables μ_{dch} et μ_{ch} représentant respectivement le temps minimum de décharge⁽¹⁾ et le temps minimum de charge⁽²⁾. En considérant un courant de décharge maximum à $2.5 \times C \cdot h^{-1}$ et un courant de charge maximum à $1 \times C \cdot h^{-1}$, nous avons $\mu_{dch} = 0.4 \text{ h}$ et $\mu_{ch} = 1.0 \text{ h}$. Ce sont ces deux nouvelles variables qui lient les puissances et la capacité de stockage⁽³⁾ (attention à la convention des signes).

$$\begin{cases} \mu_{dch} \leq & E_{BT} \times (P_{dch})^{-1} \\ \mu_{ch} \leq & E_{BT} \times (-P_{ch})^{-1} \end{cases} \quad (3.47)$$

Soit :

$$\begin{cases} E_{BT} \geq & \mu_{dch} \times P_{dch} \\ E_{BT} \geq & -\mu_{ch} \times P_{ch} \end{cases} \quad (3.48)$$

Ces inéquations délimitent une région dans le plan énergie – puissance, que nous appelons le domaine de validité du dimensionnement des batteries. Nous parlerons de graphe des contraintes technologiques, pour se référer à l'ensemble du plan énergie — puissance contenant le domaine de validité du dimensionnement des batteries. Ce graphe est représenté à la figure 3.28. L'exemple marqué sur le graphe correspond à une batterie de 100 kWh qui peut être — avec les limites en courant de charge et de décharge précédentes — chargée à -100 kW et déchargée à 250 kW.

3.6.3 Optimisation de la capacité de stockage du pack de batteries

Dans une mission de batterie, il est important de faire la différence entre les phases de charge et les phases de décharge. Pour le pack de batteries, l'expression "passer la mission" ne signifie pas l'intégration de la mission entière, mais simplement que le pack fournit toute la puissance demandée pendant les phases de décharge (partie positive d'après la convention de signe). Les phases de charge sont certes utiles pour éviter de trop "creuser" l'état de charge des batteries en cours de mission mais leur prise en compte n'est pas une obligation. Cette remarque est très importante car dans les configurations où la puissance nominale du groupe Diesel est élevée, la prise en compte sans discernement de toute l'énergie "stockable" peut conduire à un surdimensionnement excessif du pack de batteries. Pour illustrer ce phénomène, nous allons considérer la mission théorique de batterie $b(t)$ de la figure 3.29⁽⁴⁾. Il s'agit d'une mission à moyenne négative, donc à bilan énergétique

⁽¹⁾Le temps minimum de décharge correspond à la durée de décharge à la puissance maximale de décharge, la batterie étant initialement pleine.

⁽²⁾Le temps minimum de charge correspond à la durée de charge à la puissance maximale de charge, la batterie étant initialement vide.

⁽³⁾Les inéquations viennent de l'expression "temps minimum"

⁽⁴⁾Les symboles ut, up, ue signifient respectivement "unité de temps", "unité de puissance" et "unité d'énergie".
Et $ue = 5 \times up \times ut$

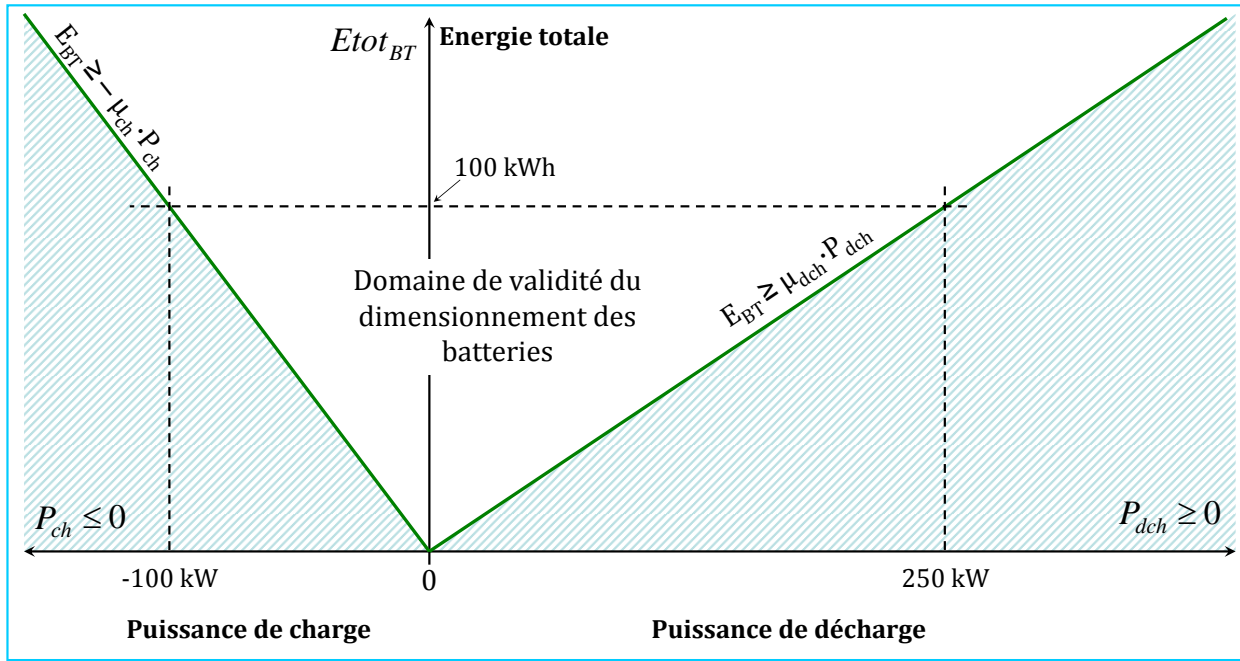


Fig. 3.28: Graphe des contraintes technologiques des batteries

positif, selon la convention de signe utilisée dans ce rapport. Le calcul de l'énergie (relative) associée à $b(t)$ par intégration simple s'écrit :

$$E(t) = - \int_0^t b(\tau) d\tau \quad (3.49)$$

L'énergie utile E_u déduite vaut alors 6ue (figure 3.29). Remarquons que le niveau d'énergie initial est plus bas que le niveau final. Cela est dû au bilan énergétique positif de la mission intégrée : toute l'énergie stockée n'a pu pas être utilisée. En d'autres termes, l'énergie utile E_u de 6ue est potentiellement surdimensionnée. Pour un dimensionnement optimal, l'objectif du stockage n'est pas de stocker de l'énergie tant que possible, mais d'en stocker le minimum nécessaire pour passer la mission dimensionnante. Or, le calcul de l'énergie par intégration simple fait exactement le contraire. Mais le surdimensionnement que nous soupçonnons ne transparaît pas de façon évidente sur la courbe de l'énergie $E(t)$ de la figure 3.29. Il est plutôt dissimulé dans cette courbe sans qu'il ne soit vraiment possible de l'identifier de façon visuelle. C'est d'ailleurs toute la subtilité de la question du surdimensionnement que nous essayons de montrer. Nous observons que le niveau final de l'énergie n'est pas ni le plus haut, ni le plus bas atteint, ce qui implique qu'a priori, le fait que ce niveau soit supérieur au niveau initial n'intervient pas dans l'estimation de l'énergie utile (donc dans le dimensionnement) qui ne dépend que des extremums du niveau d'énergie. Et pourtant il y a surdimensionnement. Une seconde piste confirme nos doutes. En effet, l'observation de la courbe de $E(t)$ montre qu'à aucun moment le pack de batteries n'est considéré saturée (plein). Tout se passe comme si toute l'énergie disponible doit être stocké. Or, en pratique, il peut arriver que le pack de batteries soit plein et donc qu'il ne soit plus possible de le charger. L'absence de la prise en compte de la capacité, nécessairement limitée, du pack de batteries est à l'origine du surdimensionnement.

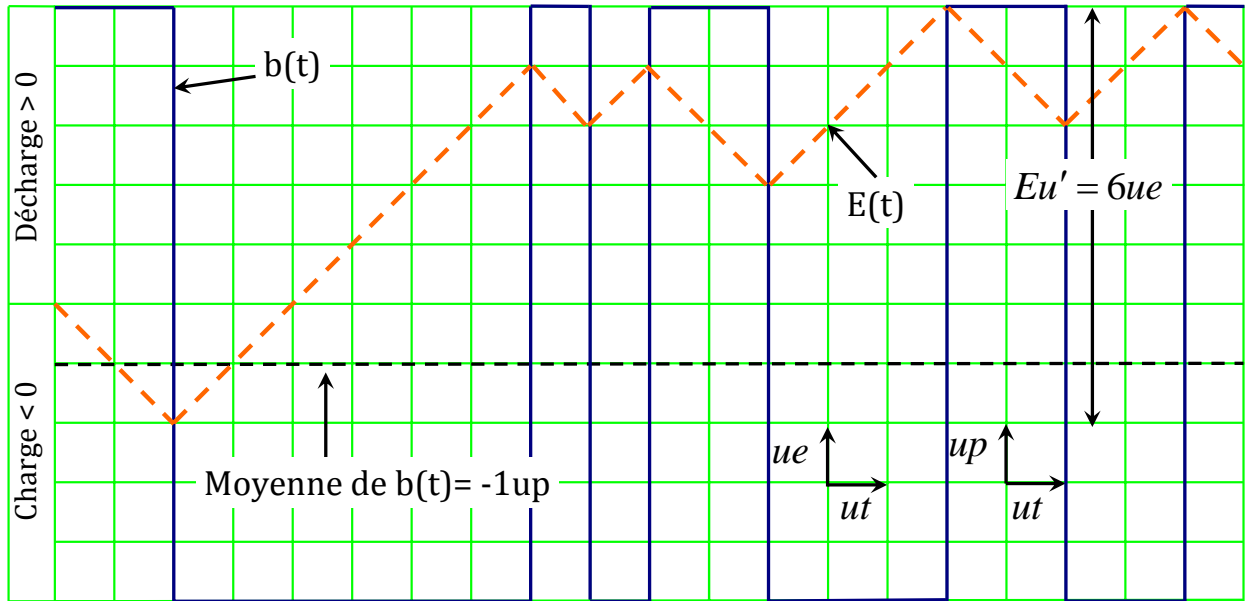


Fig. 3.29: Calcul de l'énergie par intégration simple

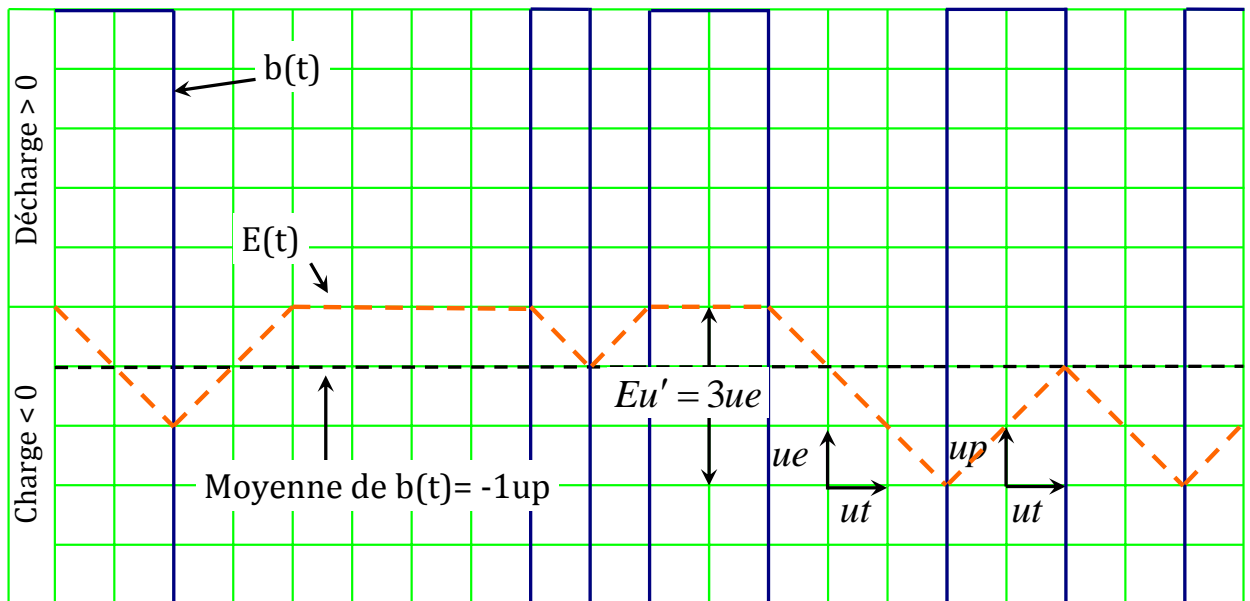


Fig. 3.30: Calcul de l'énergie par intégration saturée

Nous proposons un calcul plus complexe et plus complet que l'intégration simple qui tient compte, d'une part, du caractère limité de la capacité du pack à dimensionner et d'autre part, du fait qu'il ne sera stocké que l'énergie utile minimale nécessaire à la mission. Pour cela, nous considérons que le dispositif est plein au début de la mission, c'est-à-dire que le niveau de charge initial est le plus élevé possible. Ce niveau est arbitrairement fixé à zéro, dans le cas de notre exemple de la figure 3.30⁽¹⁾. De fait, le niveau de l'énergie ne peut plus dépasser le niveau zéro. Ensuite, pendant la mission, toute demande de puissance

⁽¹⁾Comme il s'agit d'un niveau relatif, sa valeur la plus élevée est quelconque du moment qu'elle est supérieure à tout niveau. C'est l'amplitude crête à crête de la courbe d'énergie qui importe.

est satisfaite et entraîne une décharge du pack. La puissance de charge est absorbée tant que le niveau d'énergie est plus bas que le niveau plafond (zéro). Mais lorsque le niveau d'énergie est au plafond (zéro), les phases de charge sont ignorées, jusqu'à ce que le niveau redescende à nouveau, suite à une décharge. Ce processus minimise l'énergie utile sans faillir à la mission. L'algorithme de ce processus est donné à l'annexe B.1, et est symbolisé de la façon suivante :

$$E(t) = - \int_{\text{sat}}^t b(\tau) d\tau \quad (3.50)$$

L'énergie utile calculée avec ce nouvel opérateur est deux fois plus petite que la précédente. Ce qui justifie qu'il y avait surdimensionnement.

3.6.4 Complexité du problème : étude de cas

Dans cette section, nous allons procéder à l'étude de trois cas réels. Ces cas sont délibérément choisis afin de mettre en évidence toute la complexité du problème de dimensionnement d'un pack de batteries pour la traction hybride. Dans les trois cas, le rendement du pack rd_{BT} est estimé à 81% et la profondeur de décharge DoD_{BT} est fixée à 50%. Généralement, les batteries embarquées sur des véhicules hybrides sont sollicitées entre 20 et 40% en profondeur de décharge [10, 16, 17]. Une profondeur de décharge de 50% peut donc paraître excessive, mais il y a une raison à cela. En fait, sur les quinze missions du cahier des charges seules les missions m_8 et m_{11} que nous avons identifiées comme étant les plus sévères (cf. 2.4.3, page 46), entament le pack de batteries jusqu'à 50%. Les autres missions ont une sollicitation beaucoup plus faible. Nous revenons sur cette question au chapitre 4.

◆ Premier cas

Dans le premier cas, nous considérons la mission m_8 filtrée à 3 mHz. La puissance nominale du groupe Diesel est de 120 kW. La figure 3.31 montre l'évolution des différentes puissances dimensionnantes et de l'énergie stockée. La question de savoir laquelle des deux puissances P_{BT} ou $P_{\text{BT}}^{\text{rel}}$ est choisie pour définir les extrema de puissance en décharge et en charge, n'est pas évidente⁽¹⁾. Remarquons que P_{BT} est pénalisante en charge alors que $P_{\text{BT}}^{\text{rel}}$ devient pénalisante en décharge. Nous tranchons la question en considérant le pire des cas :

$$\begin{cases} P_{\text{dch}} = \max_t (P_{\text{BT}}^{\text{rel}}(t)) \\ P_{\text{ch}} = \min_t (P_{\text{BT}}(t)) \end{cases} \quad (3.51)$$

Soit $P_{\text{dch}} = 486 \text{ kW}$ et $P_{\text{ch}} = -120 \text{ kW}$.

La courbe de l'énergie $E_{\text{BT}}(t)$ est déterminée avec l'algorithme de l'intégration saturée

⁽¹⁾La véritable puissance devant servir à cette définition est celle qui transite entre les convertisseurs et les éléments de batteries. Or, P_{BT} est la puissance en amont des convertisseurs et $P_{\text{BT}}^{\text{rel}}$ est interne aux batteries, c'est-à-dire en aval de la résistance interne des éléments de batteries.

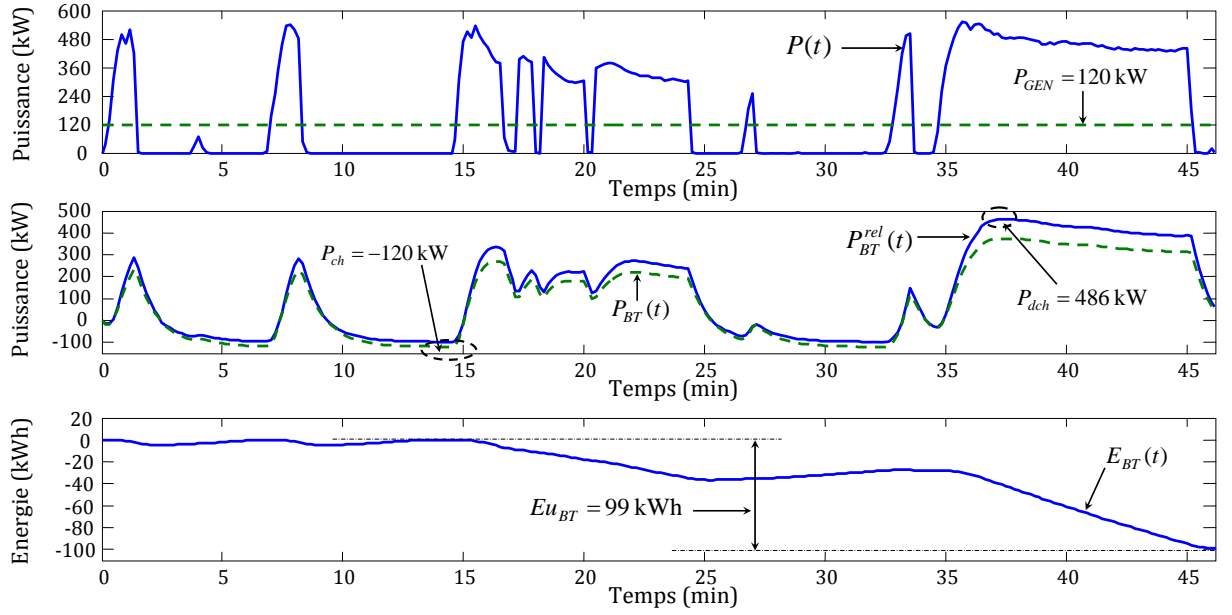


Fig. 3.31: Cas 1 : Mission m_8 , $F_{SC} = 3 \text{ mHz}$, $P_{GEN} = 120 \text{ kW}$

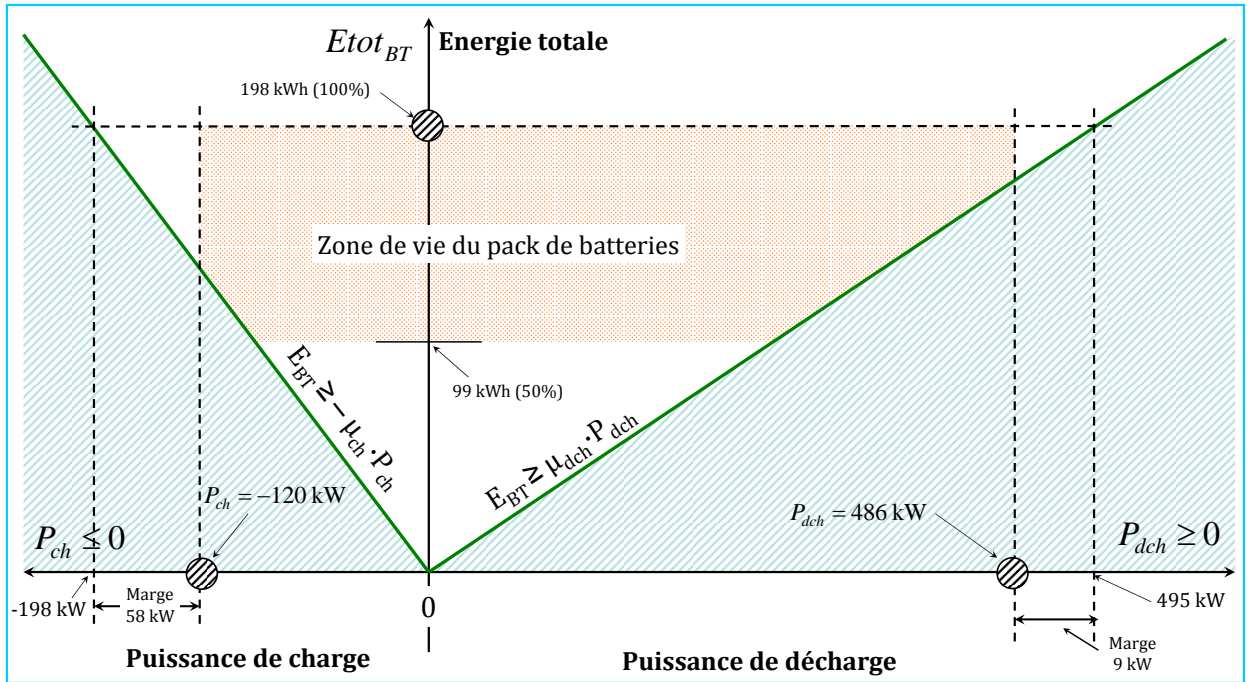


Fig. 3.32: Cas 1 : Dimensionnement contraint par l'énergie utile

introduite ci-dessus. Nous obtenons une énergie utile Eu_{BT} de 99 kWh. La capacité totale de stockage s'en déduit par :

$$Etot_{BT} = \frac{Eu_{BT}}{DoD_{BT}} \quad (3.52)$$

Soit $Etot_{BT} = 198 \text{ kWh}$.

Reportons maintenant ces valeurs sur le graphe des contraintes établi à la sous-section 3.6.2. La figure 3.32 montre que les limites de puissance -198 kW en charge et 495 kW en

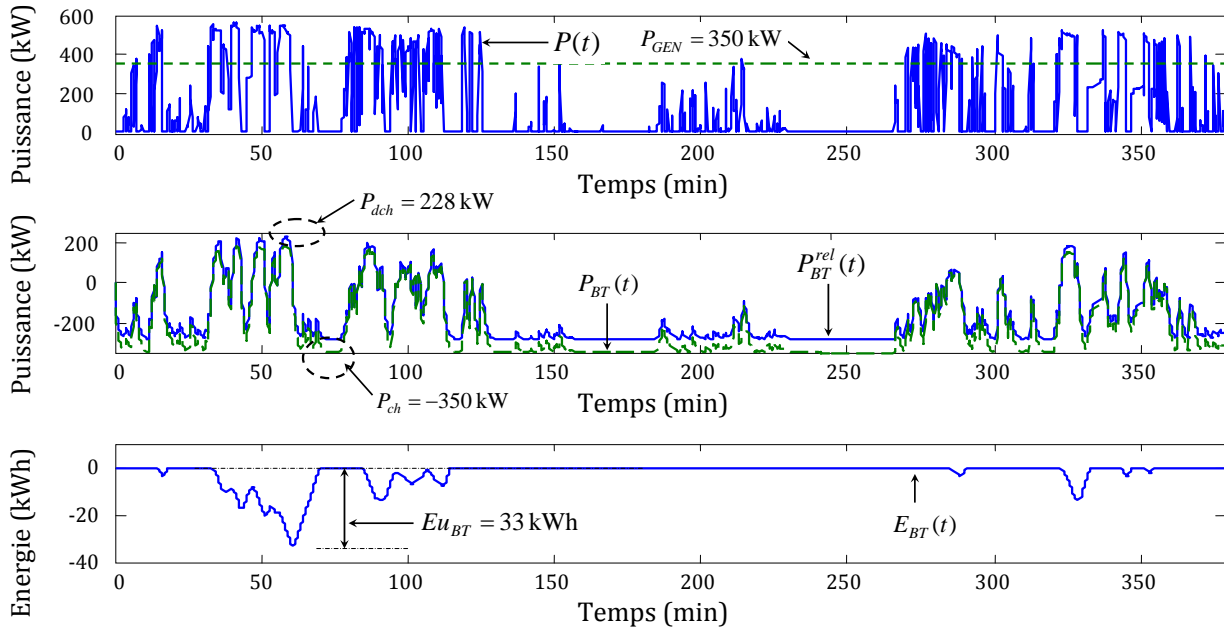


Fig. 3.33: Cas 2 : Mission m_{11} , $F_{SC} = 3 \text{ mHz}$, $P_{GEN} = 350 \text{ kW}$

décharge ne sont jamais atteintes. Le dimensionnement énergétique couvre donc les besoins en puissance : nous parlons de dimensionnement contraint par l'énergie utile. C'est le cas le plus sain⁽¹⁾ et le plus optimal⁽²⁾. Mais, dans le cadre de ce projet où nous explorons l'ensemble des configurations possibles en faisant varier sur une large plage la taille du groupe Diesel, d'autres cas se présentent qui sont plus délicats à traiter.

◆ Deuxième cas

Dans le deuxième cas, nous considérons la mission m_{11} filtrée à 3 mHz. La puissance nominale du groupe Diesel est de 350 kW. La figure 3.33 montre l'évolution des différentes puissances dimensionnantes et de l'énergie stockée. P_{dch} et P_{ch} valent respectivement 228 kW et -350 kW. L'énergie utile vaut 33 kWh soit 66 kWh de capacité totale de stockage (à 50% de profondeur de décharge). Reportons ces nouvelles valeurs sur le graphe des contraintes. La figure 3.34 montre que les limites de puissance -350 kW en charge et 228 kW en décharge ne sont pas couvertes par les 66 kWh de capacité de stockage. En d'autres termes, le dimensionnement énergétique ne permet de franchir les seuils de puissance de charge et de décharge imposés par la mission. Comme nous l'avons expliqué plus haut, la décharge est la part de mission la plus contraignante. Il est impératif que la puissance de décharge puisse passer. Nous augmentons donc la capacité de stockage de 66 à 91 kWh afin de passer la puissance crête de 228 kW ($228 \text{ kW} = 91 \text{ kWh} \times 2.5 \text{ h}^{-1}$), tout en restant dans la zone de validité du dimensionnement des batteries. À 91 kWh de capacité de stockage, le pack couvre les pics de décharge. Nous parlons alors de dimensionnement contraint par la puissance de décharge. Il reste néanmoins à résoudre le problème de la puissance de charge,

⁽¹⁾Il est logique que la batterie, qui est plutôt le véritable réservoir d'énergie sur la locomotive hybride, soit dimensionnée par le besoin en énergie.

⁽²⁾Nous verrons qu'il est difficile de faire mieux.

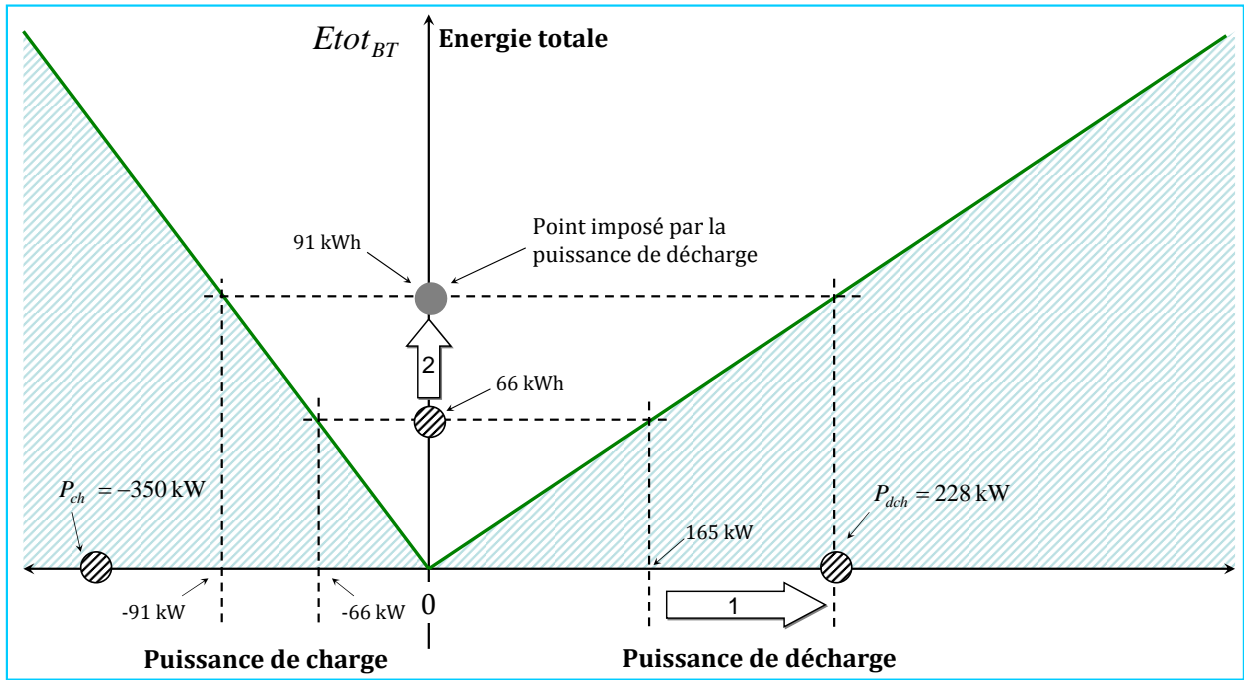


Fig. 3.34: Cas 2 : Dimensionnement contraint par la puissance de décharge

car à 91 kWh de capacité de stockage, le pack ne peut admettre une charge à -350 kW. Ce problème est abordé dans l'exemple qui suit.

◆ Troisième cas : correction de la mission du pack de batteries

Le troisième cas ressemble, à une légère différence sur le groupe Diesel près, au deuxième. Nous considérons la même mission m_{11} filtrée à 3 mHz. La puissance nominale du groupe Diesel est réduite à 300 kW au lieu de 350 kW. La figure 3.35 montre l'évolution des différentes puissances dimensionnantes et de l'énergie stockée. P_{dch} et P_{ch} valent respectivement 290 kW et -300 kW. L'énergie utile vaut 59 kWh soit 118 kWh de capacité totale de stockage (à 50% de profondeur de décharge). Reportons ces nouvelles valeurs sur le graphe des contraintes. La figure 3.36 montre que la limite de puissance 295 kW en décharge disponible dans un pack de 118 kWh couvre les besoins en puissance de la mission. Par contre, le point A obtenu (relative à la charge) n'est pas dans la zone de validité. En d'autres termes, le dimensionnement énergétique ne permet pas la charge du pack à la puissance de -300 kW telle que supposée dans la mission. Nous venons ainsi de dimensionner un pack satisfaisant les besoins en énergie et en puissance de décharge mais dont la limitation en puissance de charge ne couvre pas la puissance de charge de la mission.

La première question qui surgit est de savoir s'il est opportun, à l'instar du deuxième cas, d'augmenter la capacité de stockage du pack pour couvrir les puissances crêtes de charge. Cela ferait 300 kWh de capacité de stockage, soit une augmentation de 150%. Sachant que la puissance de charge n'est pas une contrainte absolue, une telle augmentation nous paraît excessive.

La seconde possibilité est d'ignorer les crêtes de puissance et d'écarter la charge à la limite de -118 kW admissible par le pack de 118 kWh. Mais cette solution, simple en apparence, a

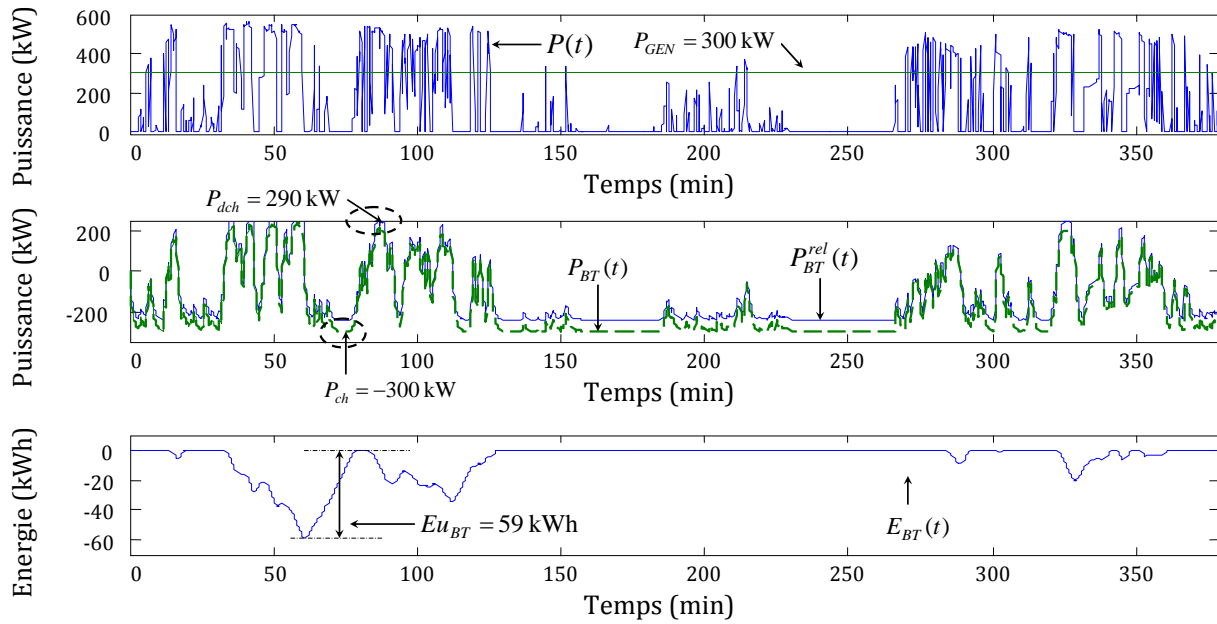


Fig. 3.35: Cas 3 : Mission m_{11} , $F_{SC} = 3 \text{ mHz}$, $P_{GEN} = 300 \text{ kW}$

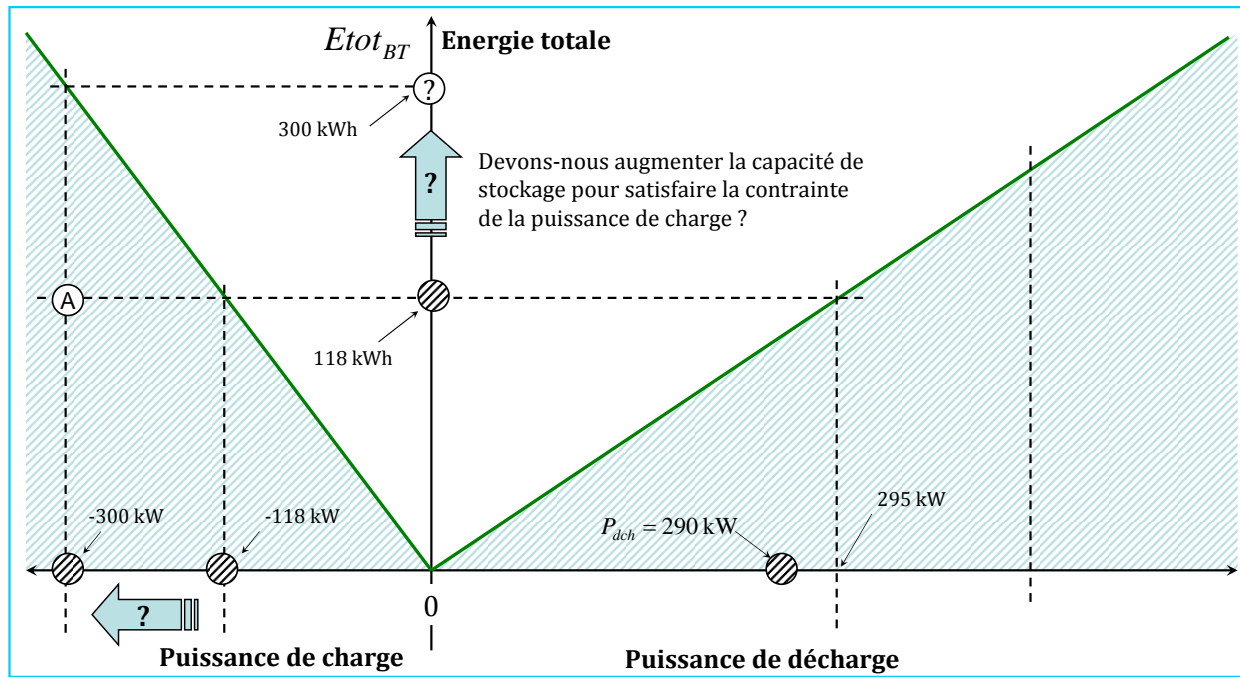


Fig. 3.36: Cas 3 : Dimensionnement contraint par la puissance de charge

une conséquence immédiate. En effet, en réduisant⁽¹⁾ la puissance de charge nous augmentons l'énergie utile nécessaire. Le pack étant moins chargé en cours de mission, sa capacité

⁽¹⁾Attention, la puissance de charge est une grandeur négative. Les verbes "réduire" et "augmenter" utilisés relativement à ce paramètre désignent une action sur sa valeur absolue. Exemple : réduction de -300 à -118 kW . En toute rigueur, nous devrions écrire : augmentation de -300 à -118 kW , mais cela pourrait prêter à confusion.

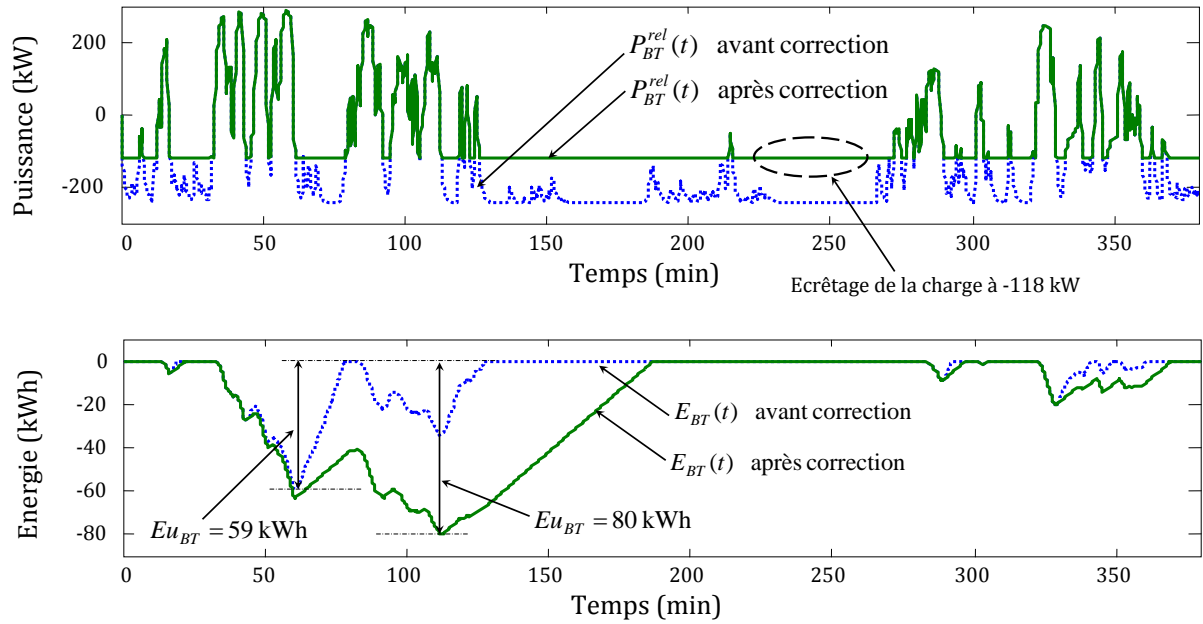


Fig. 3.37: Correction de la mission par écrêtage de la puissance de charge à -118 kW

de stockage doit augmenter pour compenser l'énergie manquante⁽¹⁾.

La figure 3.37 montre l'impact de l'écrêtage à -118 kW de la puissance de charge sur la capacité de stockage. En corrigeant la mission pour prendre en compte la limitation de puissance de charge, nous passons de 59 kWh à 80 kWh en énergie utile, soit 160 kWh au lieu de 118 kWh en capacité de stockage. Finalement, avec une capacité de stockage de 160 kWh, nous passons la mission en limitant la puissance de charge à -118 kW. Nous obtenons alors le point B bien situé dans la zone de validité (figure 3.38).

Mais il subsiste, "en toute subtilité", un léger problème. Comme le montre la figure 3.38, désormais à 160 kWh de capacité de stockage, le pack de batteries couvre largement les puissances de charge écrêtées -118 kW et les puissances de décharge. Mais le point de dimensionnement B obtenu n'est pas optimal car il se situe trop loin de la zone frontalière⁽²⁾. Concrètement, avec une capacité de stockage à 160 kWh, les possibilités de charge peuvent monter jusqu'à -160 kW. Or nous avons écrêté la charge à -118 kW. Si nous décidons de rehausser les limitations en charge de -118 kW à -160 kW, la capacité de stockage va se réduire⁽³⁾. Nous pourrions jouer à ce jeu longtemps avant de converger vers un point de dimensionnement optimal.

La situation est résumée à la figure 3.39. Au point A la capacité de stockage E_A n'est pas suffisante car elle correspond à une puissance de charge beaucoup plus élevée (en valeur absolue) qu'elle ne peut admettre. Au point B, la capacité de stockage E_B est suffisante mais pas nécessaire. De fait, il est certain que le point de dimensionnement optimal X se situe entre les points A et B. La caractéristique du point X est la suivante :

⁽¹⁾La règle est simple : plus nous chargeons en cours de mission, moins de batteries nous avons besoin d'embarquer.

⁽²⁾Comme dans tout problème d'optimisation, les zones frontalières sont les plus optimales.

⁽³⁾Rappelons la règle : plus nous chargeons en cours de mission, moins de batteries nous avons besoin d'embarquer.

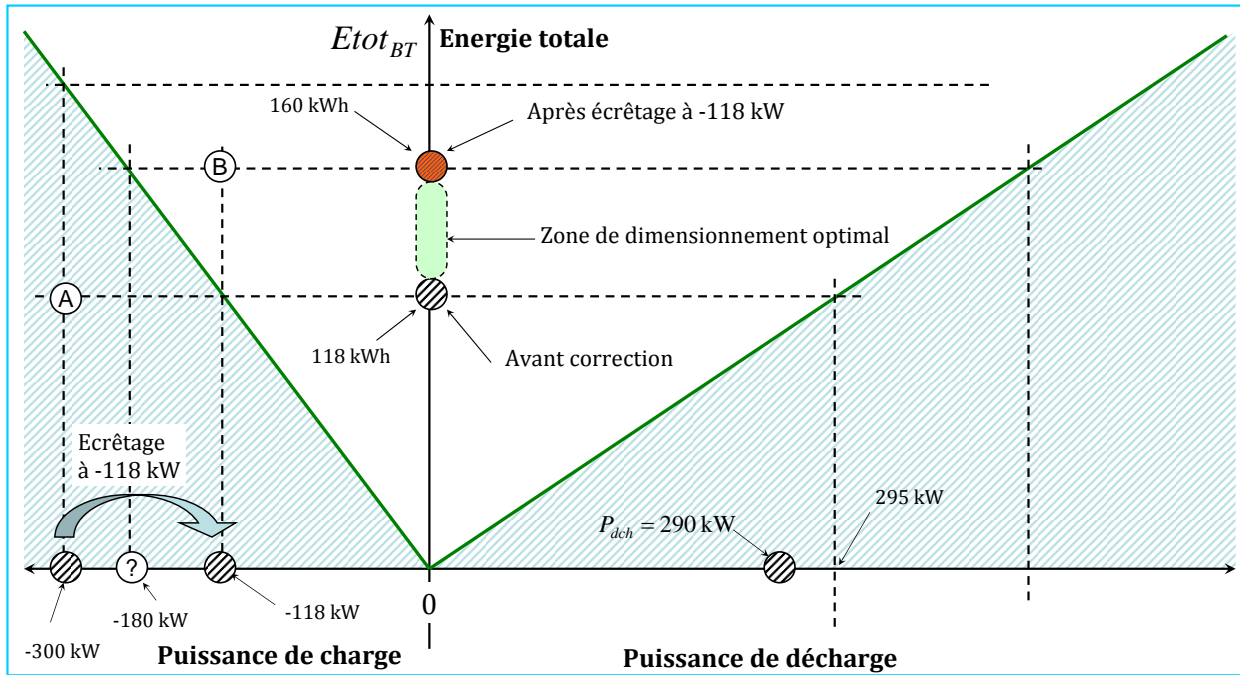


Fig. 3.38: Dimensionnement issu de l'écrêtage de la puissance de charge

Lorsque les phases de charge de la mission sont écrêtées à P_X , la capacité totale E_X est telle que le point X de coordonnées (P_X, E_X) se situe dans la zone de validité au plus près de la ligne frontalière. La question qu'il reste à résoudre est de savoir comment déterminer le point X. La détermination du point X passe par une formalisation informatique du problème, puis par l'élaboration d'un algorithme de recherche dichotomique. Ce problème est traité à l'annexe B.3.

Dans cette sous-section, nous avons mis en évidence la complexité du problème de dimensionnement du pack de batteries pour la traction hybride. Les exemples traités nous ont permis d'identifier trois cas possibles. Le premier, le plus simple, est le cas de dimensionnement contraint par l'énergie utile. En l'occurrence, c'est le besoin en énergie qui dimensionne les batteries. C'est le cas le plus fréquent. Le deuxième cas est moins conventionnel que le premier. En effet dans le deuxième cas, le dimensionnement énergétique⁽¹⁾ ne permet pas de couvrir les crêtes de puissance de décharge imposées par la mission. Lorsque l'écart entre la puissance de décharge disponible et celle imposée par la mission est relativement faible, la solution qui s'impose est de rehausser la capacité de stockage jusqu'à satisfaction des contraintes de puissance de décharge. Si, par contre, l'écart entre la puissance de décharge disponible et celle imposée par la mission est trop élevé, il convient de se poser la question de l'adéquation de la mission et du type de stockage⁽²⁾. Le troisième cas pose un problème beaucoup plus subtil. En effet, la recharge du dispositif de stockage en cours de mission est très précieuse dans un véhicule hybride car elle compense

⁽¹⁾Sur la base du besoin en énergie.

⁽²⁾La prédominance des contraintes de puissance sur le besoin énergétique suppose la nécessité d'aller vers des systèmes de stockage plus denses en puissance comme les volants d'inertie ou les supercondensateurs.

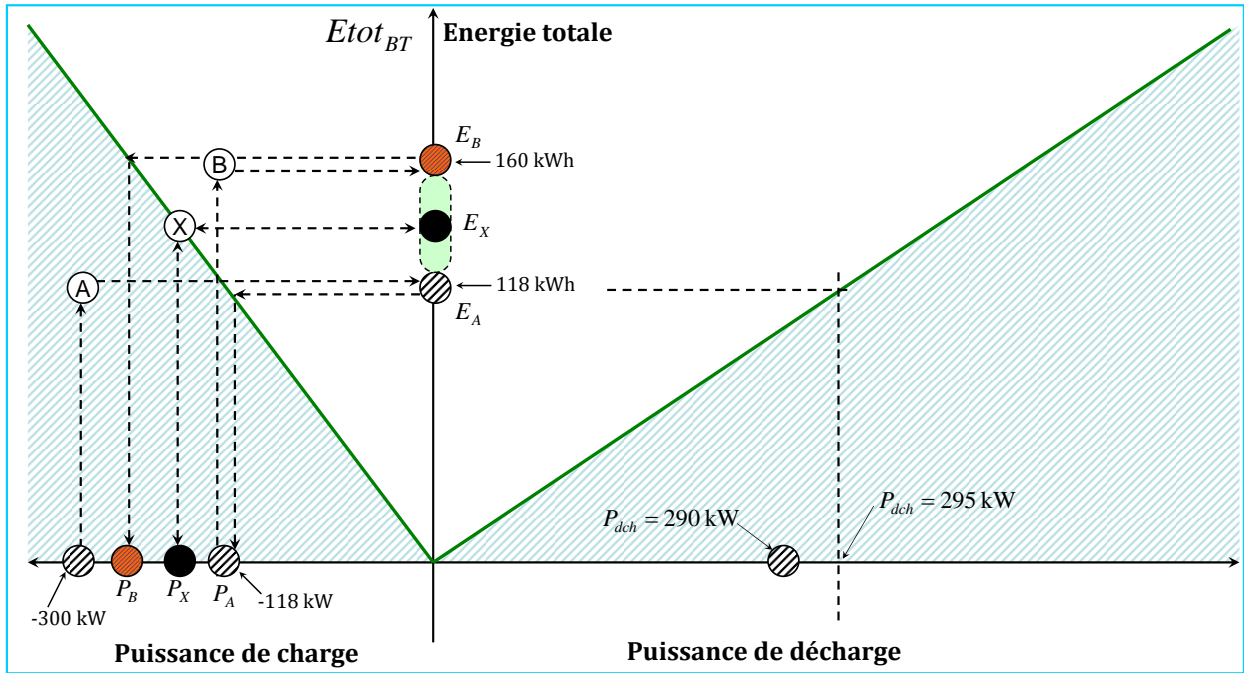


Fig. 3.39: Recherche du dimensionnement optimal

en temps réel l'énergie utilisée et réduit donc les besoins en énergie stockée. Nous avons montré que l'interdépendance entre la capacité de stockage et la limitation en puissance de charge complexifie énormément la recherche du dimensionnement optimal et nécessite un algorithme de recherche opérationnelle.

3.6.5 Algorithme de dimensionnement du pack de batteries

Sur la base des différents cas étudiés à la section précédente, nous avons élaboré l'algorithme de dimensionnement des batteries. Comme le montre la figure 3.40, nous avons simplifié au maximum l'algorithme en encapsulant les processus complexes.

CEUPIS : Calcule l'énergie utile par intégration saturée. Cet algorithme est étudié à l'annexe B.2. Il permet de calculer l'énergie utile minimum nécessaire pour assurer une mission donnée. Ce processus retourne la capacité de stockage minimum nécessaire qui est proportionnelle, à la profondeur de décharge près, à l'énergie utile.

COR : Réalise la correction des missions par simple écrêtage de la puissance de charge à une valeur donnée, comme le montre la figure 3.37. Dans le cas de l'algorithme de la figure 3.40, P_{BT}^{rel} est la mission à corriger et P_B ($P_B < 0$) est la puissance maximale de charge.

RDDO : Recherche dichotomique du dimensionnement optimal. Cet algorithme résout le problème de l'interdépendance entre la limitation en puissance de charge et la capacité de stockage du pack de batteries. Cet algorithme est abordé à l'annexe B.3.

Nous distinguons globalement trois branches principales conformément aux trois cas étudiés plus haut. Les marquages en "cercles numérotés" nous permettent de décrire les

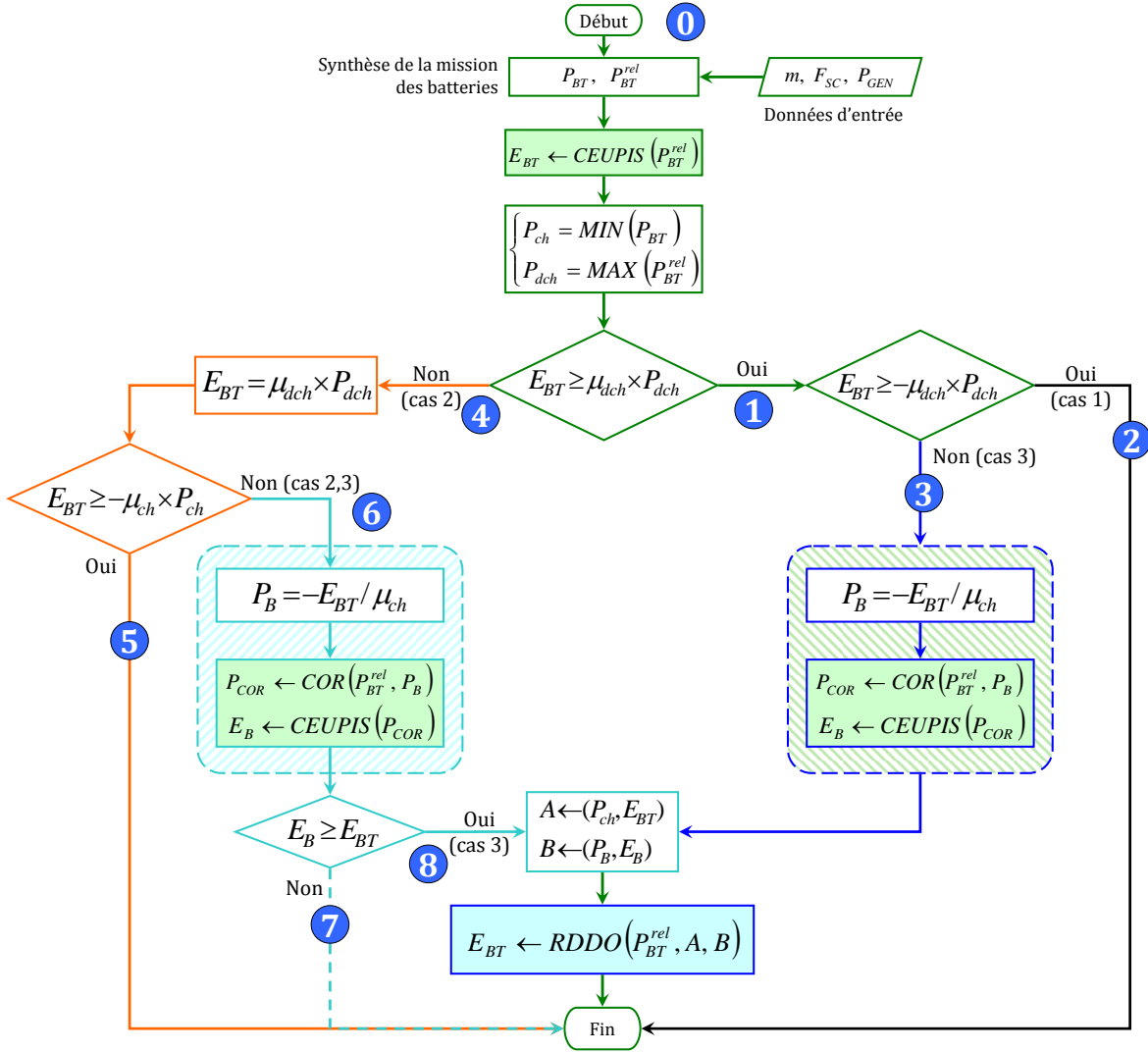


Fig. 3.40: Algorithme du dimensionnement des batteries

différents "chemins" de l'algorithme. Les données d'entrée sont : la mission m , la fréquence de filtrage F_{SC} et la puissance nominale du groupe Diesel P_{GEN} . Dans la partie commune (0) à tous les "chemins", nous faisons la synthèse de la mission du pack de batteries, sur la base des équations Eq.3.33 et Eq.3.36 (page 74). Puis, nous calculons la capacité de stockage avec l'algorithme **CEUPIS** et les puissances de charge et de décharge maximales.

- Le cas 1 correspond au "chemin" $0 \rightarrow 1 \rightarrow 2$. La capacité de stockage calculée suffit pour couvrir les besoins en puissance de décharge et en puissance de charge.

$$\begin{cases} E_{BT} \geq \mu_{dch} \times P_{dch} \\ E_{BT} \geq -\mu_{ch} \times P_{ch} \end{cases}$$

Le processus prend alors fin et E_{BT} est retenue comme étant le dimensionnement du pack. C'est le cas de dimensionnement contraint par l'énergie utile.

- Le cas 2 correspond au "chemin" $0 \rightarrow 4 \rightarrow 5$. La capacité de stockage calculée ne suffit pas pour couvrir la puissance de décharge imposée par la mission.

$$E_{BT} < \mu_{dch} \times P_{dch}$$

Dans ce cas, la capacité de stockage est augmentée jusqu'à couvrir la contrainte de décharge. La nouvelle valeur de la capacité de stockage suffit pour couvrir les besoins en puissance de charge.

$$\begin{cases} E_{BT} = & \mu_{dch} \times P_{dch} \\ E_{BT} \geq & -\mu_{ch} \times P_{ch} \end{cases}$$

Le processus prend alors fin et E_{BT} est retenue comme étant le dimensionnement du pack. C'est le cas de dimensionnement contraint par la puissance de décharge.

- Le cas 3 correspond au "chemin" $0 \rightarrow 1 \rightarrow 3$. La capacité de stockage calculée suffit pour couvrir la puissance de décharge imposée par la mission mais ne permet pas de conserver la puissance de charge disponible dans la mission.

$$\begin{cases} E_{BT} \geq & \mu_{dch} \times P_{dch} \\ E_{BT} < & -\mu_{ch} \times P_{ch} \end{cases}$$

C'est le cas le plus subtil. Retenons que, dans ce cas, nous recherchons par itérations dichotomique la limitation de la puissance de charge qui permet de réduire au mieux la capacité de stockage (cf. Annexe B.3).

Il y a une connection entre les cas 2 et 3 qui peut se produire lorsque l'augmentation de la capacité dans le cas 2 ne résout pas le problème de la puissance de charge. En fin de dimensionnement, la traduction de la capacité de stockage E_{BT} en nombre N_{BT} de cellules de batterie se fait par la relation :

$$N_{BT} \leq \frac{E_{BT}}{E_{BT}^0} < N_{BT} + 1 \quad (3.53)$$

3.6.6 Analyse des résultats du dimensionnement

La figure 3.41 montre l'organisation des données en entrée et en sortie de l'algorithme donné à la figure 3.40. Nous disposons d'un classeur de quinze missions, d'une table de fréquence de valeurs allant de 0.1 mHz à 100 mHz suivant une échelle logarithmique et d'une table de groupes Diesel (puissance nominale) évoluant par pas de 25 kW entre 25 et 600 kW. En sortie du processus, nous obtenons un classeur de quinze tableaux à deux dimensions contenant le nombre de cellules de batterie en fonction de la fréquence de filtrage F_{SC} et de la puissance nominale du groupe Diesel P_{GEN} . L'analyse des résultats nous permet, d'une part, de confirmer les conclusions du chapitre 2 sur l'identification des missions m_8 et m_{11} comme étant les missions dimensionnantes du cahier des charges, et d'autre part, de comparer l'impact des paramètres F_{SC} et P_{GEN} sur la taille du pack de batteries.

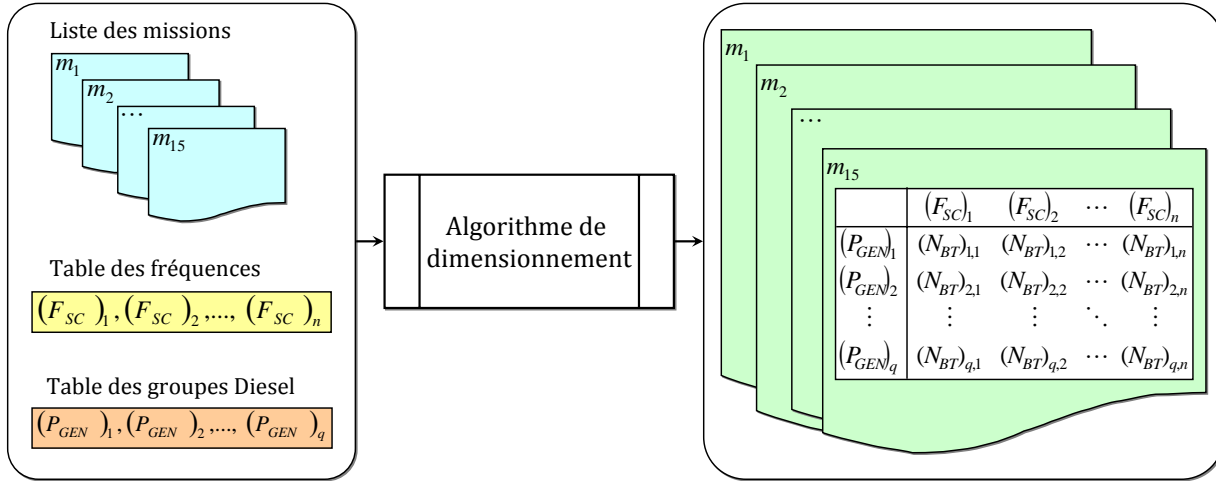


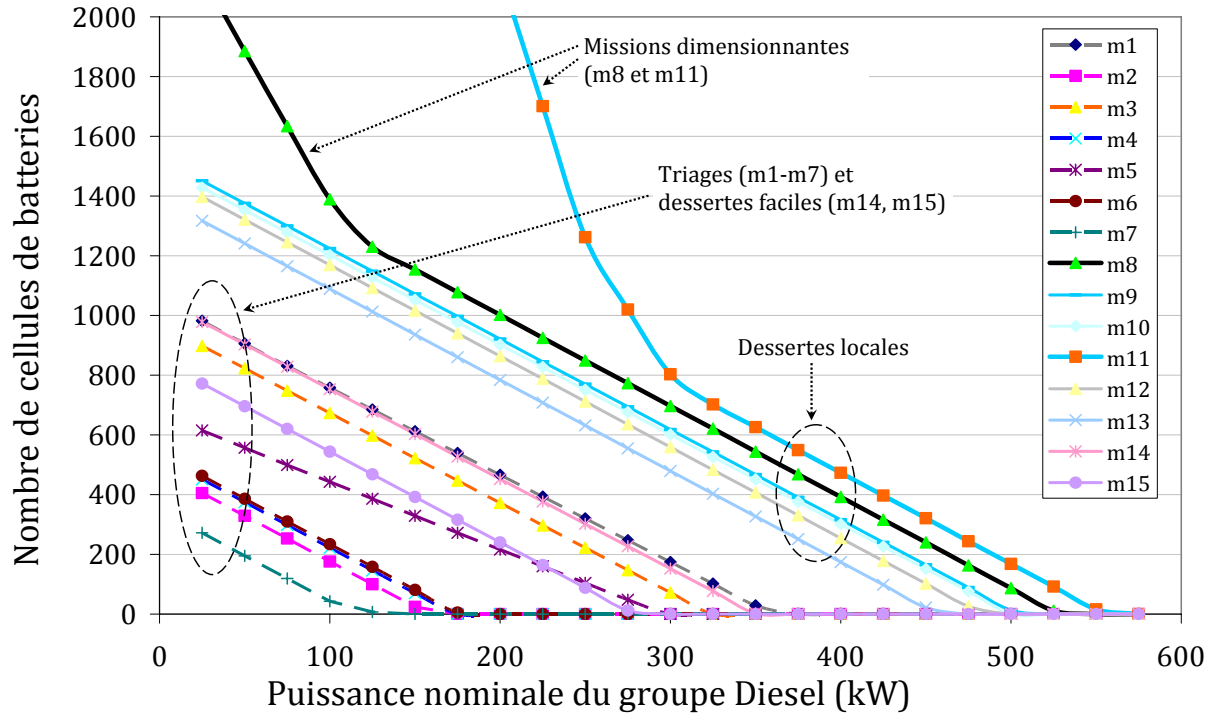
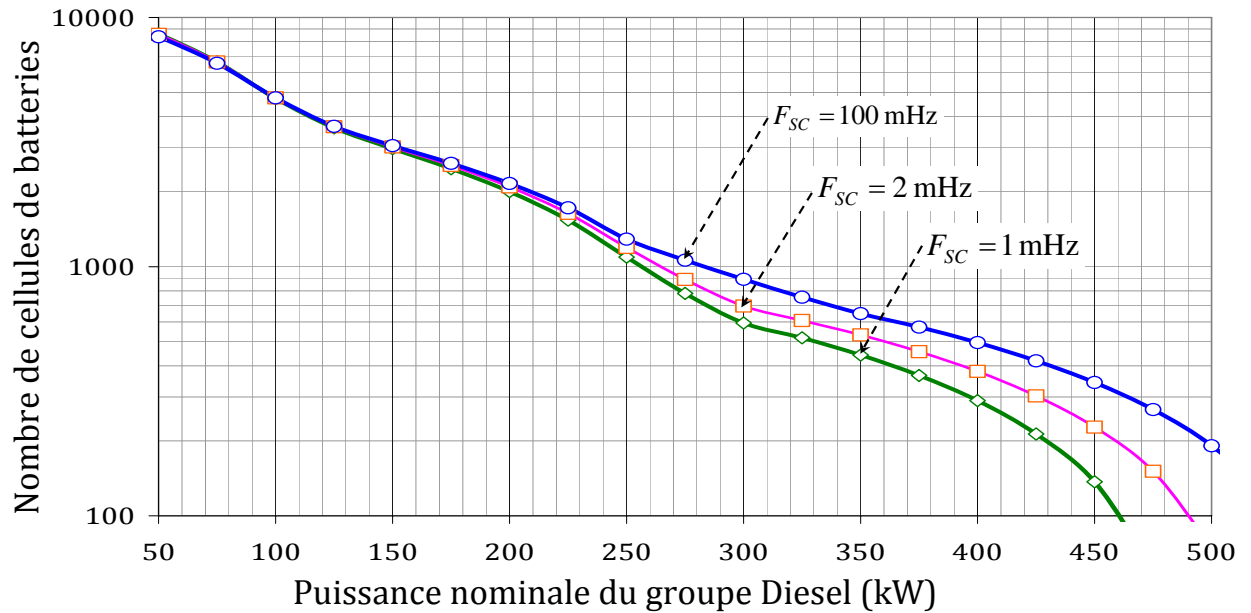
Fig. 3.41: Données en entrée et en sortie du processus de dimensionnement des batteries

Nous avons étudié à la section §2.2, une nouvelle approche de la notion de mission. Nous avons proposé une application de cette approche, aux missions ferroviaires. Cette application nous a permis d'identifier les missions m_8 et m_{11} comme étant les missions dimensionnantes du cahier des charges de la plate-forme de démonstration LHyDIE. Nous avons même pu établir que la mission m_{11} domine quasiment l'ensemble des missions du cahier des charges. La figure 3.42 montre l'évolution du nombre de batteries pour chacune des missions du cahier des charges, en fonction du groupe Diesel pour une fréquence de filtrage de 6.1 mHz⁽¹⁾. Nous notons une dominance globale des dessertes locales sur les triages conformément aux conclusions de la section 2.4.3 (page 46). Il apparaît clairement que les missions m_8 , m_{11} dominent véritablement les autres missions (surtout m_{11} dont le dimensionnement s'impose aux autres missions). Ces résultats viennent confirmer l'étude de la section 2.3 (page 31). Nous pouvons désormais poursuivre le dimensionnement énergétique à l'aide de la seule mission m_{11} .

La figure 3.43 montre, pour la mission dimensionnante m_{11} , l'évolution du nombre de batteries⁽²⁾ en fonction de la puissance nominale du groupe Diesel pour trois valeurs de la fréquence de filtrage 1 mHz, 2 mHz et 100 mHz. La réduction de la puissance nominale du groupe Diesel entraîne une croissance quasi-exponentielle du nombre de batteries. Par contre, la fréquence de filtrage a une influence relativement faible, surtout pour les petits groupes Diesel. Il y a plusieurs raisons à cela : d'une part, le contenu en énergie de la mission filtrée (les harmoniques de fréquences supérieures) reste relativement limité donc la quasi-totalité du contenu en énergie de la mission est assurée par les batteries ; d'autre part, la prédominance du pack de batteries pour les petits groupes Diesel justifie le faible effet de la fréquence de filtrage. L'effet de la fréquence de filtrage est plus perceptible pour les grands groupes Diesel, car la prédominance du pack de batteries se réduit alors.

⁽¹⁾Par souci de simplification, nous nous sommes limités à une seule fréquence de filtrage, mais pour n'importe quelle autre fréquence de filtrage, les positions relatives des courbes restent quasiment les mêmes.

⁽²⁾Attention, afin de provoquer l'écartement des courbes et de faciliter la lisibilité, nous utilisons une double échelle logarithmique (log-log).

Fig. 3.42: Missions dimensionnantes : $F_{SC} = 6.1 \text{ mHz}$ Fig. 3.43: Influence des paramètres F_{SC} et P_{GEN} sur N_{BT}

3.6.7 Conclusion

Nous avons abordé, dans cette section, le dimensionnement du pack de batteries. Nous avons montré la complexité du problème de dimensionnement des accumulateurs électrochimiques, due aux multiples contraintes liées à cette technologie. Les résultats du dimensionnement montrent que, des deux paramètres d'entrée, la puissance nominale du groupe influe nettement plus que la fréquence de filtrage, sur le nombre de batteries.

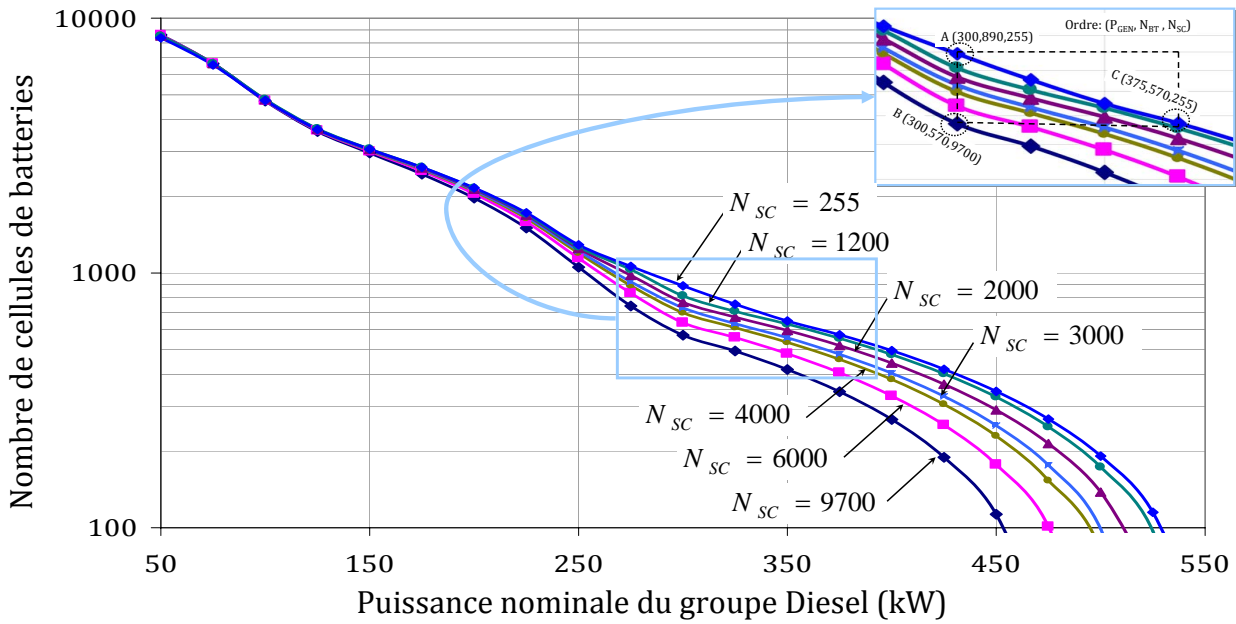


Fig. 3.44: Dimensionnement de la plate-forme de démonstration LHyDIE

3.7 Dimensionnement de la plate-forme de démonstration LHyDIE

Dans cette section, nous faisons une synthèse du dimensionnement de la locomotive hybride LHyDIE. Nous avons traité jusqu'ici, de façon isolée, le dimensionnement du pack de supercondensateurs et celui des batteries. Le choix de la fréquence F_{SC} détermine le nombre N_{SC} de supercondensateurs à embarquer. Mais c'est le choix, à la fois, de la fréquence F_{SC} et de la puissance nominale P_{GEN} du groupe Diesel qui détermine le nombre N_{BT} de batteries à embarquer. Il est donc possible de lier le triplet $(N_{SC}, N_{BT}, P_{GEN})$. En d'autres termes, le choix de deux quelconques des membres du triplet $(N_{SC}, N_{BT}, P_{GEN})$ détermine le troisième et donc une configuration possible de la locomotive. La figure 3.44 montre l'évolution du nombre de batteries en fonction de la puissance nominale du groupe Diesel et du nombre de supercondensateurs.

Nous retenons globalement que le nombre de batteries à embarquer augmente de façon exponentielle⁽¹⁾ lorsque la taille du groupe Diesel décroît.

Précisons quelques points clés, correspondant tous au même nombre de supercondensateurs embarqués, à savoir 1525 :

- avec 300 kW de puissance Diesel, il faudra environ 790 cellules de batteries.
- En passant à 250 kW de puissance Diesel, le nombre de cellules de batteries monte à 1300. Entre le premier point et celui-ci, 50 kW de moins en puissance Diesel, entraîne 510 éléments de batteries en plus ;
- avec 200 kW de puissance Diesel, le nombre de batteries s'élève à 2200, soit une augmentation de 900 cellules pour 50 kW de puissance Diesel en moins ;
- avec 150 kW de puissance Diesel, soit deux fois moins que le premier point, le nombre de batteries s'élève à 3060 soit 4 fois celui du premier point.

⁽¹⁾L'axe des N_{BT} de la figure 3.44 est à l'échelle logarithmique.

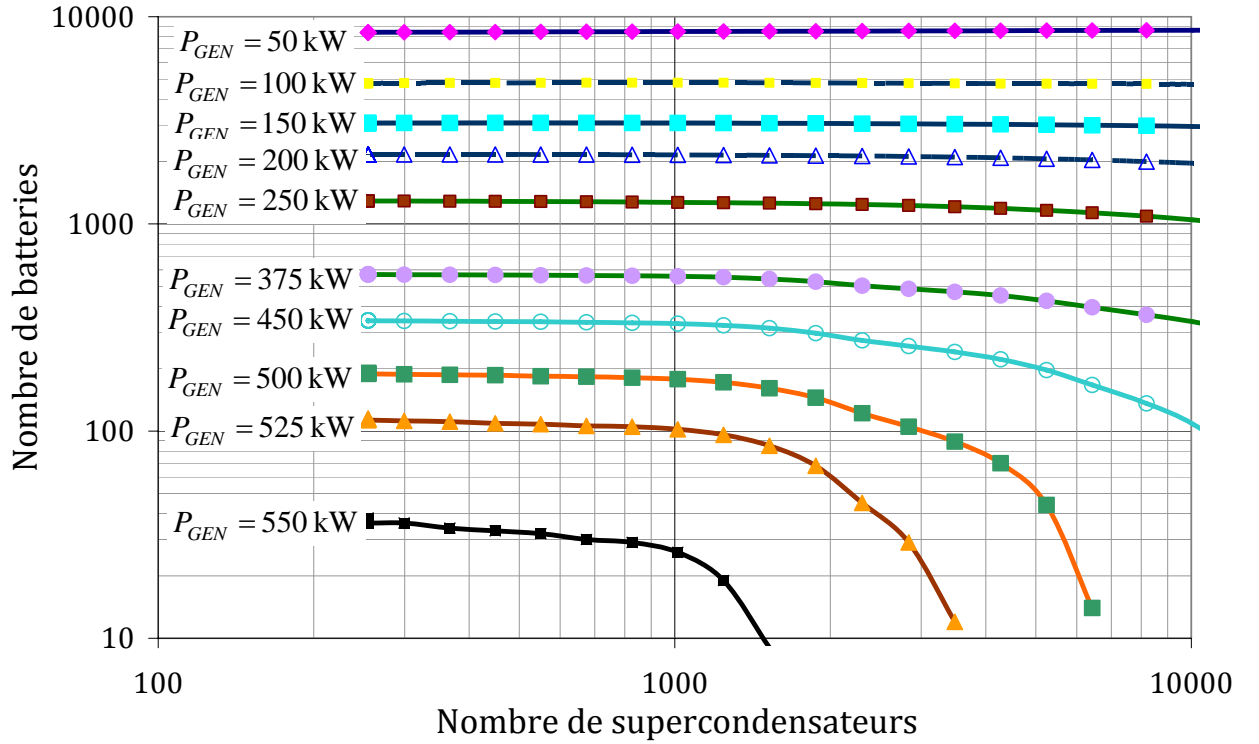


Fig. 3.45: Influence énergétique des supercondensateurs sur le reste du système

Nous notons globalement que l'influence des supercondensateurs sur le dimensionnement énergétique des autres sources est relativement faible, surtout pour les petits groupes Diesel. Pour appuyer cette observation, considérons les trois points mis en évidence sur le graphe de la figure 3.44 :

- le point A est caractérisé par : 300 kW de puissance Diesel, 890 batteries et 255 supercondensateurs ;
- le point B est caractérisé par : 300 kW de puissance Diesel, 570 batteries et 9700 supercondensateurs ;
- et le point C est caractérisé par : 370 kW de puissance Diesel, 570 batteries et 255 supercondensateurs ;

Les points A et B correspondant à la même puissance diesel, les comparer entre eux nous permet d'obtenir l'influence des supercondensateurs sur les batteries. Entre les points A et B, nous observons une variation ΔN_{BT} de 320 éléments de batteries pour ΔN_{SC} de 9445 éléments de supercondensateurs. soit un rapport :

$$\frac{\Delta N_{BT}}{\Delta N_{SC}} \approx 34\%$$

Même si ce chiffre n'est rigoureusement valable que localement, il traduit tout de même la faible influence du nombre de supercondensateurs sur le nombre de batterie⁽¹⁾.

Les points B et C correspondant au même nombre de batteries, les comparer entre eux nous permet d'obtenir l'influence des supercondensateurs sur la taille du groupe Diesel.

⁽¹⁾Il n'y a pas de concurrence possible entre supercondensateurs et batteries, en tout cas pas à l'état actuel de l'avancement de ces technologies.

Entre les points B et C, nous observons une variation ΔP_{GEN} de 75 kW pour ΔN_{SC} de 9445 éléments de supercondensateurs. Il ne fait aucun doute que le nombre de supercondensateurs influe très peu sur la taille du groupe Diesel. La figure 3.45 renforce l'idée que, pour la mission dimensionnante (desserte locale) sur le plan de l'énergie et de la puissance, la présence des supercondensateurs n'a quasiment pas d'influence sur le dimensionnement des autres sources. Pour les petits groupes Diesel (< 250 kW) le nombre de batteries reste quasiment constant, quel que soit le nombre de supercondensateurs. Lorsque les groupes deviennent conséquents (≥ 300 kW), le nombre de batteries se réduisant, l'influence des supercondensateurs devient perceptible.

3.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la synthèse du dimensionnement et de la gestion énergétique d'une locomotive hybride. Dans un premier temps, nous avons présenté la caractérisation des différentes sources impliquées dans ce projet. Puis, nous avons proposé une stratégie de gestion dite "fréquentielle" qui permet d'assurer une bonne comptabilité entre les parts de mission et la nature des sources mises en face. Ensuite, nous avons présenté le modèle de synthèse en flux de puissance de la locomotive hybride. Ce modèle basé sur un bilan de puissance complet permet de prendre en compte les pertes du système. Enfin, nous avons présenté les techniques de dimensionnement qui ont permis de procéder au dimensionnement énergétique de la locomotive hybride.

L'approche par synthèse, à l'aide du modèle systémique en flux de puissance et à travers les paramètres de la gestion fréquentielle, nous a permis de balayer une panoplie de configurations possibles du démonstrateur LHyDIE. Mais elle ne fournit aucune indication sur la faisabilité économique et écologique de ces solutions et ne suffit donc pas pour faire le choix de la meilleure configuration. Le chapitre qui suit, aborde l'étude de faisabilité selon les critères de volume, de dégradation temporelle des missions, de coût, de durée de vie et de consommation de fuel.

Chapitre 4

Conception systémique séquentielle d'une locomotive hybride : analyse

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté une démarche de synthèse appliquée à la conception d'une locomotive hybride. Cette étude, appliquée au démonstrateur LHyDIE, nous a permis de générer un ensemble de configurations (N_{SC} , N_{BT} , P_{GEN}) susceptibles d'assurer les missions du cahier des charges. Dans ce chapitre, nous présentons la démarche inverse de la synthèse, l'analyse, qui permet d'une part de valider les résultats de la phase de synthèse et d'autre part de finaliser le dimensionnement du démonstrateur LHyDIE. Nous présentons, dans un premier temps, le modèle d'analyse en flux de puissance qui permet de "jouer" les missions du cahier des charges, avec les différentes configurations issues de la synthèse. Une étude de faisabilité est présentée qui permet d'identifier les meilleures configurations selon un jeu de critères. Pour la configuration choisie par la SNCF, nous présentons, à travers un modèle électrique, une analyse plus étoffée qui nous a permis de proposer un dimensionnement plus précis du démonstrateur, par le choix de la tension de bus, le calcul des nombres de cellules de stockage (batteries et supercondensateurs) en série et en parallèle et le dimensionnement des convertisseurs.

Ce chapitre est organisé en plusieurs sections. Dans la première (§4.1), nous présentons le modèle d'analyse en flux de puissance des différentes composantes de la locomotive hybride, puis nous étudions quelques résultats de simulation. La section 4.2 présente les critères de faisabilité considérés dans cette étude. Il s'agit notamment du volume et du coût d'investissement du système, de la dégradation temporelle des missions, de la durée de vie des batteries et de la consommation de fuel. Une étude de faisabilité est ensuite présentée à la section 4.3 qui permet d'identifier les meilleures configurations selon ces critères. A l'issue de cette étude de faisabilité, nous présentons la configuration du démonstrateur choisie par la SNCF. A la section 4.4, nous présentons le calcul des nombres de cellules de stockage en série et en parallèle et le choix de la tension du bus continu, le dimensionnement

des convertisseurs statiques et des éléments passifs associés. Vient ensuite la section 4.5 qui conclut cette phase d'analyse.

4.1 Modèle d'analyse en flux de puissance

Dans cette section, nous présentons les modèles d'analyse en flux de puissance des principales composantes de la locomotive. Il s'agit essentiellement du groupe Diesel, du pack de batteries, du pack de supercondensateurs ainsi que de la gestion énergétique. Ces modèles partiels sont ensuite intégrés dans le modèle d'analyse global de la locomotive. Nous présentons aussi, sur la base de simulations, une analyse comportementale du modèle global.

4.1.1 Modèle d'analyse en flux de puissance du groupe Diesel

Comme nous l'avons expliqué à la section 3.2.1 (page 54), le modèle comportemental du groupe Diesel admet en entrée, la puissance fournie P_{GE} et la vitesse de rotation du moteur thermique N (tr/min), et en sortie, la consommation spécifique C_s (L/h ou g/kWh) et les émissions polluantes (CO_2 , NO_x , HC, CO et les particules) émises. Les difficultés d'accès aux cartographies, nous ont contraints à limiter notre étude à la consommation et aux émissions de CO_2 .

Le modèle d'analyse du groupe Diesel est calqué sur le modèle comportemental présenté à la section 3.2.1 (page 54). La présence des batteries permet d'éteindre le groupe Diesel lorsque celui-ci n'est plus sollicité, ce qui réduit les phases de ralenti où la consommation et la pollution sont très mauvaises. De plus, le fonctionnement en marche/arrêt du groupe Diesel permet de réduire les nuisances sonores. Il convient tout de même de prendre quelques précautions pour la mise en oeuvre d'une telle stratégie. En effet, des arrêts et redémarrages trop rapprochés peuvent entraîner l'effet contraire et accélérer le vieillissement de certaines pièces du groupe Diesel⁽¹⁾. Dans ce chapitre, nous considérons que le groupe fonctionne à régime constant, car ce régime est plus facile à mettre en oeuvre⁽²⁾. Comme le montre la figure 4.1, il y a deux consignes en entrée du modèle : P_{GEref} et MA_{GE} représentant respectivement la consigne de puissance et la consigne de marche/arrêt. La consigne de puissance P_{GEref} est échantillonnée à l'aide d'un bloc de saturation, pour prendre en compte la puissance maximale disponible P_{GEM} . Notons que, de façon générale pour un groupe Diesel de puissance nominale P_{GEN} , la puissance maximale disponible vaut :

$$P_{GEM} = 1.1 \times P_{GEN} \quad (4.1)$$

En sortie de cette saturation, nous obtenons la puissance P_{GE} fournie par le groupe Diesel au reste du système. L'intégration de cette puissance nous donne l'énergie totale E_{GE} fournie par le groupe Diesel. L'application du rendement rd_{GE} à la puissance fournie P_{GE}

⁽¹⁾Nous y revenons à la section 4.1.4 (à la page 105).

⁽²⁾La mise en oeuvre d'un fonctionnement à régime variable nécessite des cartographies plus complexes dont nous ne disposons pas. Néanmoins, au chapitre 5 où nous développons la gestion énergétique en temps réel du démonstrateur LHyDIE, nous allons présenter un pilotage à régime variable du groupe Diesel.

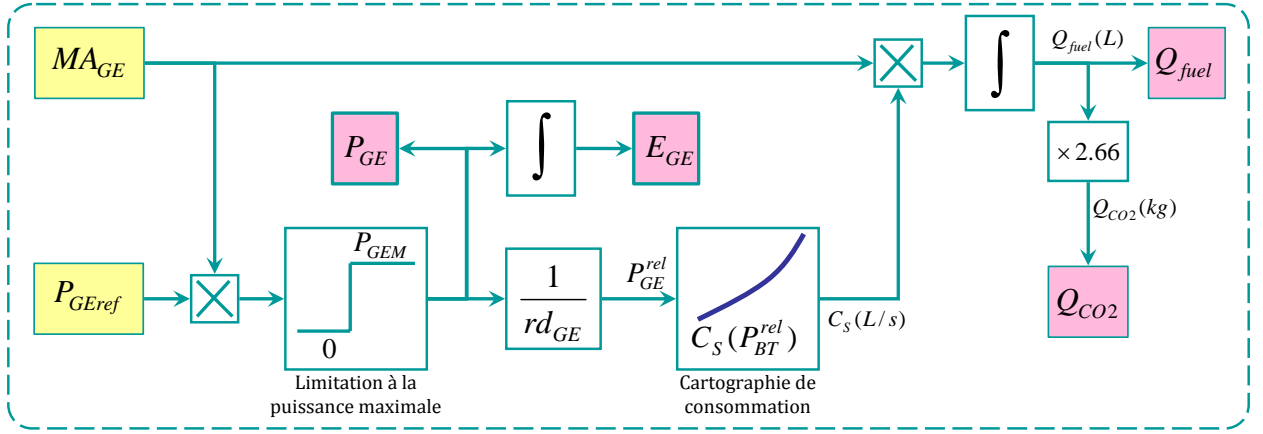


Fig. 4.1: Modèle d'analyse en flux de puissance du groupe Diesel

donne la puissance réellement "consommante" $P_{GE}^{rel(1)}$. Le calcul de la consommation se fait à partir de la cartographie de consommation, qui traduit le flux de puissance P_{GE}^{rel} en débit de fuel C_S (L/h). Ce débit de fuel est ensuite traduit par intégration, en quantité de fuel Q_{fuel} (L), ce qui permet de calculer la quantité de CO_2 émise Q_{CO_2} (kg).

Par ailleurs, la consigne MA_{GE} , ne prenant que deux valeurs possibles (0/1), permet soit de valider ou soit de geler les flux de puissance ou de fuel.

Pour simuler ce modèle, nous avons besoin de connaître la cartographie de consommation. Mais l'accès à une telle cartographie, même pour un seul groupe Diesel, est un véritable "parcours du combattant". Nous ne disposons, dans le cadre ce projet, que de deux cartographies de consommation : celle d'un groupe nouvelle génération de 215 kW et celle d'un groupe plus ancien de 610 kW. Nous présenterons à la section 4.2.4, une extrapolation à partir de ces deux cartographies permettant de contourner le problème des cartographies manquantes.

Remarque: Notons que le flux de puissance P_{GE}^{rel} qui correspond à la puissance réellement "consommante" n'est pas une sortie du modèle. En effet cette puissance n'est pas visible de l'extérieur et n'a absolument aucun intérêt en dehors du modèle du groupe Diesel. Par contre, la puissance P_{GE} correspond à la réponse du groupe Diesel à la consigne P_{GEref} .

⁽¹⁾En effet, il est important que ce soit la puissance fournie P_{GE} qui serve au calcul de l'énergie fournie au reste du système et que ce soit la puissance P_{GE}^{rel} , intégrant les pertes internes du sous-système groupe Diesel, qui serve au calcul de la consommation. En fait, les pertes internes au sous-système groupe Diesel ne sont pas perçues de l'extérieur, mais se traduisent plutôt par un excès de consommation.

4.1.2 Modèles d'analyse en flux de puissance du pack de batteries

La cellule de batterie étant caractérisée par sa capacité de stockage E_{BT}^0 , sa puissance maximale de décharge P_{dchmax}^0 et sa puissance maximale de charge P_{chmax}^0 (cf. §3.6.2, page 81), les paramètres du pack de N_{BT} batteries se déduisent par :

$$\begin{cases} E_{totBT} &= N_{BT} \times E_{BT}^0 \\ P_{chmax} &= N_{BT} \times P_{chmax}^0 \\ P_{dchmax} &= N_{BT} \times P_{dchmax}^0 \end{cases} \quad \text{sachant que : } (P_{chmax}^0 < 0) \quad (4.2)$$

Le modèle d'analyse en flux de puissance du pack de batteries est donné à la figure 4.2. En entrée, le pack reçoit la consigne de puissance P_{BTref} . Cette consigne subit une première saturation liée aux limites technologiques du pack, de façon à ne pas dépasser les limitations de puissance P_{dchmax} et P_{chmax} . A l'issue de cette saturation, la mission est séparée en deux parties exclusives et complémentaires : la puissance de charge (P_{ch}) d'un côté et la puissance de décharge (P_{dch}) de l'autre. A chacune de ces deux parties, est appliqué un contrôle par hystérésis qui permet d'arrêter la charge, lorsque l'état de charge du pack atteint 99% (la charge n'est ré-autorisée qu'en dessous de 97% soit une largeur d'hystérésis de 2%) et d'arrêter la décharge lorsque l'état de charge du pack atteint 30% (la décharge n'est ré-autorisée qu'au-dessus de 32% soit une largeur d'hystérésis de 2%). La sommation des deux flux de puissance permet d'obtenir la puissance P_{BT} fournie par le pack au reste du système. Ensuite, vient l'application du rendement du pack permettant de calculer la puissance P_{BT}^{rel} réellement transformée en énergie. L'énergie stockée E_{BT} est obtenue par intégration de la puissance P_{BT}^{rel} .

$$E_{BT}(t) = E_{BT0} - \int_0^t P_{BT}^{rel}(\tau) d\tau \quad (4.3)$$

E_{BT0} est l'état de charge initial du pack⁽¹⁾. L'état de charge edc_{BT} du pack est donné par le rapport de l'énergie stockée E_{BT} sur la capacité totale de stockage E_{totBT} .

Dans ce modèle, il y a deux types de butées : une butée de puissance et une butée d'énergie. La butée de puissance est liée aux limitations de puissance dues aux limites technologiques du pack. Elle est mise en oeuvre à travers le bloc de saturation en entrée du modèle. La butée d'énergie est liée aux limitations de puissance dues à l'état de charge. Elle est mise en oeuvre à travers le contrôle par hystérésis de la charge et de la décharge, en fonction de l'état de charge du pack.

Remarque: Comme pour le modèle du groupe Diesel, la puissance P_{BT}^{rel} est interne au modèle et n'est pas visible de l'extérieur. Par contre, la puissance P_{BT} correspond à la réponse de la batterie à la consigne P_{BTref} .

4.1.3 Modèle d'analyse en flux de puissance du pack capacitif

Le modèle d'analyse en flux de puissance du pack capacitif est pratiquement identique à celui du pack de batteries. La cellule de supercondensateur étant caractérisée par sa capa-

⁽¹⁾Attention, ne pas confondre l'état de charge initial E_{BT0} et la capacité de stockage par cellule E_{BT}^0 .

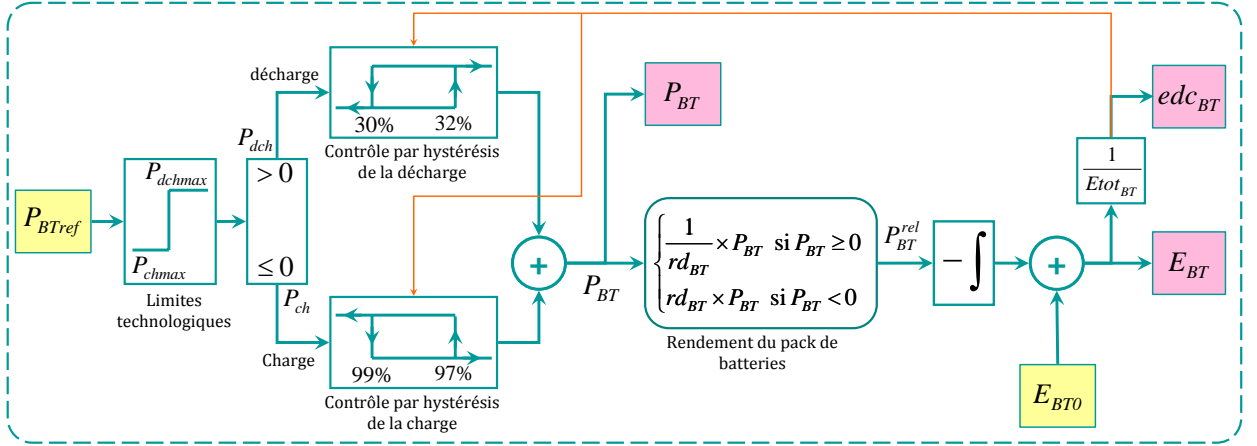


Fig. 4.2: Modèle d'analyse en flux de puissance du pack de batteries

cité de stockage E_{SC}^0 et sa puissance maximale P_{scmax}^0 (cf. §3.5.3, page 75), les paramètres du pack de N_{SC} éléments se déduisent par :

$$\begin{cases} Etot_{SC} = N_{SC} \times E_{SC}^0 \\ P_{scmax} = N_{SC} \times P_{scmax}^0 \end{cases} \quad (4.4)$$

Le modèle d'analyse en flux de puissance du pack de supercondensateurs est donné à la figure 4.3. En entrée, le pack reçoit la consigne de puissance P_{SCref} . Cette consigne subit une première saturation liée aux limites technologiques du pack, de façon à ne pas dépasser les limitations de puissance P_{scmax} et $-P_{scmax}$. A l'issue de cette saturation, la mission est séparée en deux parties exclusives et complémentaires : la puissance de charge d'un côté et la puissance de décharge de l'autre. A chacune de ces parties est appliqué un contrôle par hystérésis qui permet, pour la puissance de charge, d'arrêter la charge lorsque l'état de charge atteint 99% (la charge n'est ré-autorisée qu'en dessous de 97% soit une largeur d'hystérésis de 2%). Pour la puissance de décharge, elle est mise à zéro lorsque l'état de charge atteint 20% (la décharge n'est ré-autorisée qu'au-dessus de 22% soit une largeur d'hystérésis de 2%). La sommation des deux flux de puissance permet d'obtenir la puissance P_{SC} fournie par le pack au reste du système. Ensuite vient l'application du rendement du pack pour calculer la puissance P_{SC}^{rel} réellement transformée en énergie. L'énergie stockée E_{SC} est obtenue par intégration de la puissance P_{SC}^{rel} . L'état de charge edc_{SC} du pack est donné par le rapport de l'énergie stockée E_{SC} sur la capacité totale de stockage $Etot_{SC}$. Comme pour les batteries, il y a deux types de butées : une butée de puissance et une butée d'énergie.

4.1.4 Modèle d'analyse en flux de puissance de la gestion

Sur le principe, le modèle d'analyse en flux de puissance de la gestion énergétique est similaire à son équivalent utilisé pour la synthèse (cf. §3.22, page 74). Nous conservons le principe du filtrage de la mission et le système de compensation des pertes du pack supercapacitif. Mais contrairement au modèle de synthèse, le modèle d'analyse doit gérer, en plus, la consigne de marche/arrêt du groupe Diesel. La figure 4.4 montre

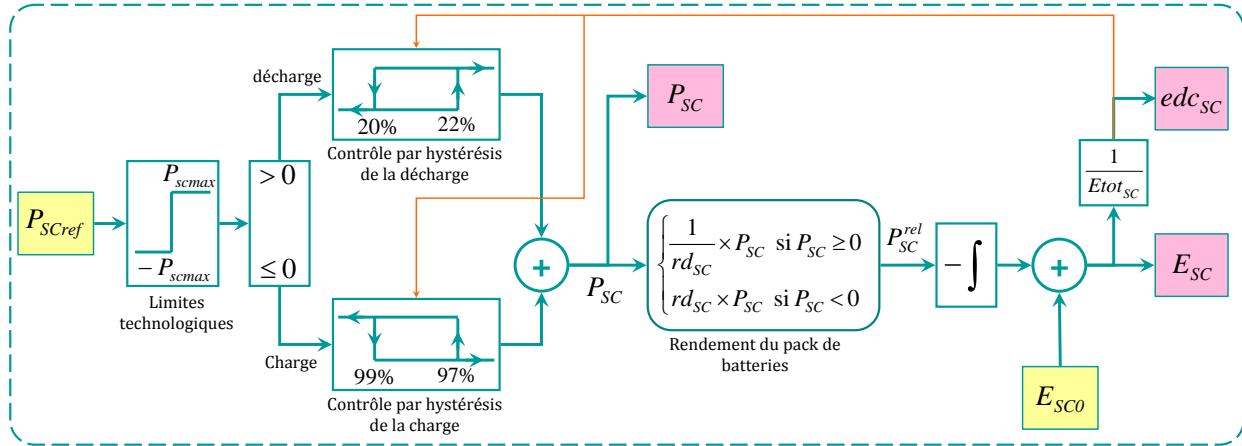


Fig. 4.3: Modèle d'analyse en flux de puissance du pack capacitif

le modèle d'analyse en flux de puissance de la gestion énergétique. Nous ne reviendrons pas sur les parties communes au modèle de synthèse étudié au chapitre 3. Focalisons-nous sur le bloc "Gestion du groupe Diesel". Ce bloc présente, en entrée, la puissance $P_{BT,GE}$ à partager entre le groupe Diesel et le pack de batteries, et l'état de charge edc_{BT} du pack de batteries. En sortie, le bloc "Gestion du groupe Diesel" produit la consigne MA_{GE} de marche/arrêt du groupe Diesel et le signal de fin de mission FM. La présence du signal de fin de mission nous renvoie, encore une fois, à la problématique de "dégradation temporelle des missions", à laquelle nous avons fait référence au début du chapitre 3 : les batteries devant retrouver leur état de charge initial en fin de mission, le bloc "Gestion du groupe Diesel" prolonge la mission au-delà de sa durée réelle, par une phase de recharge à l'arrêt des batteries. Le signal FM indique la fin de cette phase et donc la fin effective de la mission. Nous revenons plus largement sur cette problématique à la section 4.2.2 de ce chapitre. Malgré la simplicité de son interface avec le reste du système, le bloc "Gestion du groupe Diesel" n'en est pas moins complexe.

La figure 4.5 montre le processus contenu dans le bloc "Gestion du groupe Diesel". Notons qu'en plus des entrées et sorties, il y a quelques variables utiles à la compréhension de l'algorithme de gestion du groupe Diesel.

t	contient l'information du temps ;
P_{dchmax}	est la puissance de décharge maximale admissible par le pack de batteries ;
t_{max}	est la durée réelle de la mission en cours ;
dmf	est la durée minimale de marche avant arrêt (10 min) ;
dma	est la durée minimale d'arrêt avant redémarrage (1 min) ;
$edc_{BT,i}$	est l'état de charge initial des batteries. Il est fixé à 95% ;
$tempo$	variable intermédiaire.
mar	variable intermédiaire.

Le processus est constitué de deux étages : un étage de décision et un étage de temporisation. L'étage de décision prend les décisions de mise en marche ou d'arrêt du groupe Diesel et repère la fin effective de la mission. L'étage de temporisation permet d'assurer un fonctionnement cohérent du groupe Diesel, en temporisant les décisions de marche/arrêt de façon à satisfaire les délais nécessaires entre les arrêts et les démarrages successifs.

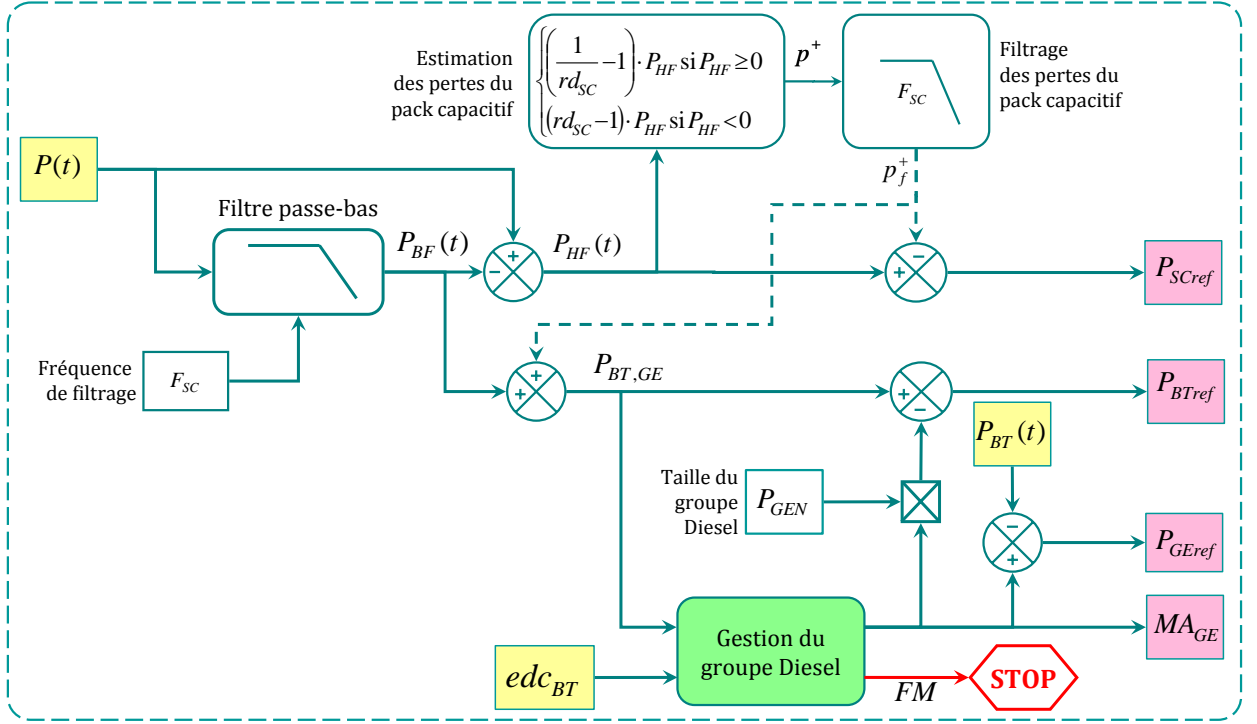


Fig. 4.4: Modèle d'analyse en flux de puissance de la gestion énergétique

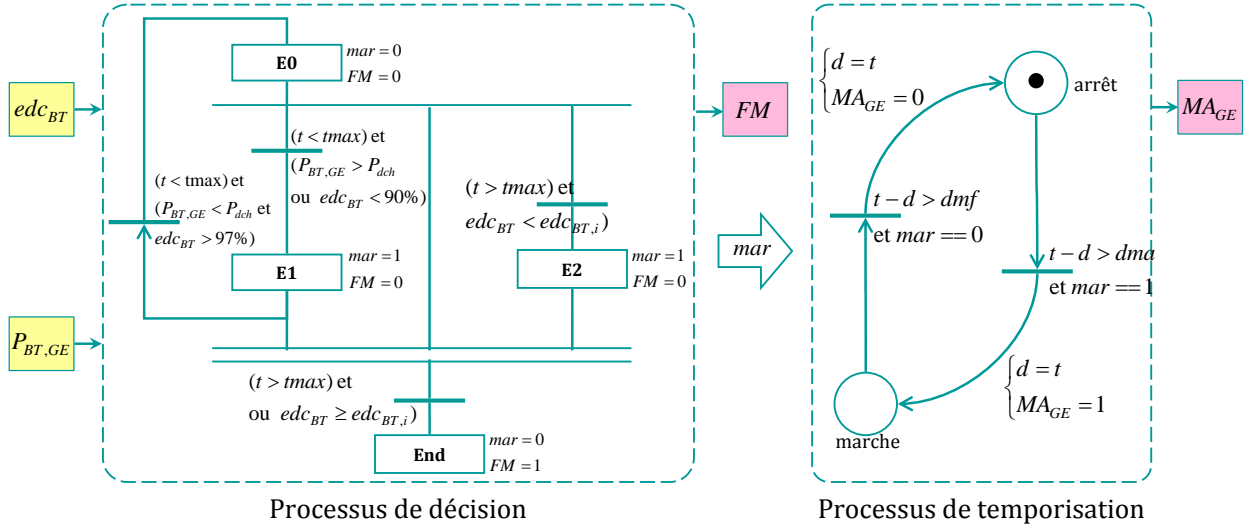


Fig. 4.5: Bloc de gestion du groupe Diesel

L'étage de décision comprend quatre états principaux. Initialement, le processus est dans l'état E0 où le groupe est éteint et la consigne de fin de simulation est mise à zéro. Le processus reste dans cet état jusqu'à ce que l'une des conditions suivantes se produise :

$$C 1 : (t < t_{max}) \text{ et } (P_{BT,GE} > P_{dch} \text{ ou } edc_{BT} < 90\%) \quad \text{mar} = 1, FM = 0 \quad (4.5)$$

$$C 2 : (t \geq t_{max}) \text{ et } edc_{BT} < edc_{BT,i} \quad \text{mar} = 1, FM = 0 \quad (4.6)$$

$$C 3 : (t \geq t_{max}) \text{ et } edc_{BT} \geq edc_{BT,i} \quad \text{mar} = 0, FM = 1 \quad (4.7)$$

La première condition traduit le fait que, d'une part, la durée réelle de la mission n'est pas encore atteinte et d'autre part, soit le besoin en puissance dépasse la capacité des batteries, soit les batteries sont déchargées en dessous de 90%⁽¹⁾. Cette condition provoque le passage dans l'état **E1**, où est demandée la mise en marche du groupe Diesel, à travers la variable intermédiaire **mar**.

De l'état **E1**, le processus passe à l'état **E0** si la mission réelle court encore, si le besoin de puissance passe en dessous de la capacité des batteries et si le niveau de charge des batteries est passé au-dessus de $97\% = 90\% + 7\%$. L'hystérésis de 7% permet d'assurer la stabilité de l'algorithme⁽²⁾.

De l'état **E1**, le processus passe directement dans l'état final **End**, si la mission réelle est arrivée au bout et si l'état de charge des batteries passe au-dessus de sa valeur initiale $edc_{BT,i}$.

La deuxième condition traduit le fait que la mission réelle est terminée mais que les batteries sont encore en dessous de leur état de charge initial. Dans ce cas, le processus passe dans l'état **E2** où est demandée la mise en marche du groupe Diesel, à travers la variable intermédiaire **marche**. Dès que l'état de charge initial des batteries est atteint, le processus passe directement à l'état final **End**.

La troisième condition traduit le fait que la mission réelle est terminée et que les batteries ont retrouvé leur état de charge initial. Le processus passe alors dans l'état final **End**. Cette branche n'est jamais empruntée à l'initialisation, sauf en cas de mission nulle. Notons que, dans l'état **End**, le signal de fin de simulation **MF** est activé (mis à 1)

Le deuxième étage assure la cohérence de la consigne marche/d'arrêt du groupe Diesel perçue à l'extérieur. Il garantit, par un réseau de pétri de temporisation, le respect des temps minimums d'arrêt et de fonctionnement du groupe Diesel. A chaque basculement du réseau de pétri, un compteur permet d'assurer l'écoulement du temps **dma** (entre le passage de l'état "arrêt" à l'état "marche") et du temps **dmf** (entre le passage de l'état "marche" à l'état "arrêt"), avant le prochain basculement. Concrètement, le réseau de pétri est initialisé à l'état "arrêt". Lorsque le temps d'arrêt **dma** s'est écoulé et qu'une demande de mise en marche est initiée par l'étage de décision, c'est-à-dire :

$$\text{si } t - d > dma \text{ et } mar == 1 \quad (4.8)$$

le réseau de pétri bascule dans l'état "marche", en faisant l'action :

$$d = t \text{ et } MA_{GE} = 1 \quad (4.9)$$

⁽¹⁾Ce niveau de charge peut paraître trop élevé, mais il n'en est rien. En effet, pour ne pas laisser creuser l'état de charge des batteries, nous estimons qu'il faut réagir à partir de 90%. Mais cela ne veut pas dire que la gestion énergétique réussit à maintenir le niveau de charge des batteries au-dessus de 90%, pour toutes les missions, loin de là. Pour une mission difficile, malgré le seuil de réaction de 90%, les batteries se vident quand même, jusqu'à 30%. Par ailleurs, ce seuil permet de recharger régulièrement les batteries, en cours de mission, pour ne pas avoir à les recharger trop en fin de mission et aggraver la dégradation temporelle de la mission.

⁽²⁾Sans l'hystérésis, l'étage de décision peut présenter un "affolement" incontrôlé en basculant rapidement et continûment de l'état **E1** à **E0**, puis de **E0** à **E1**.

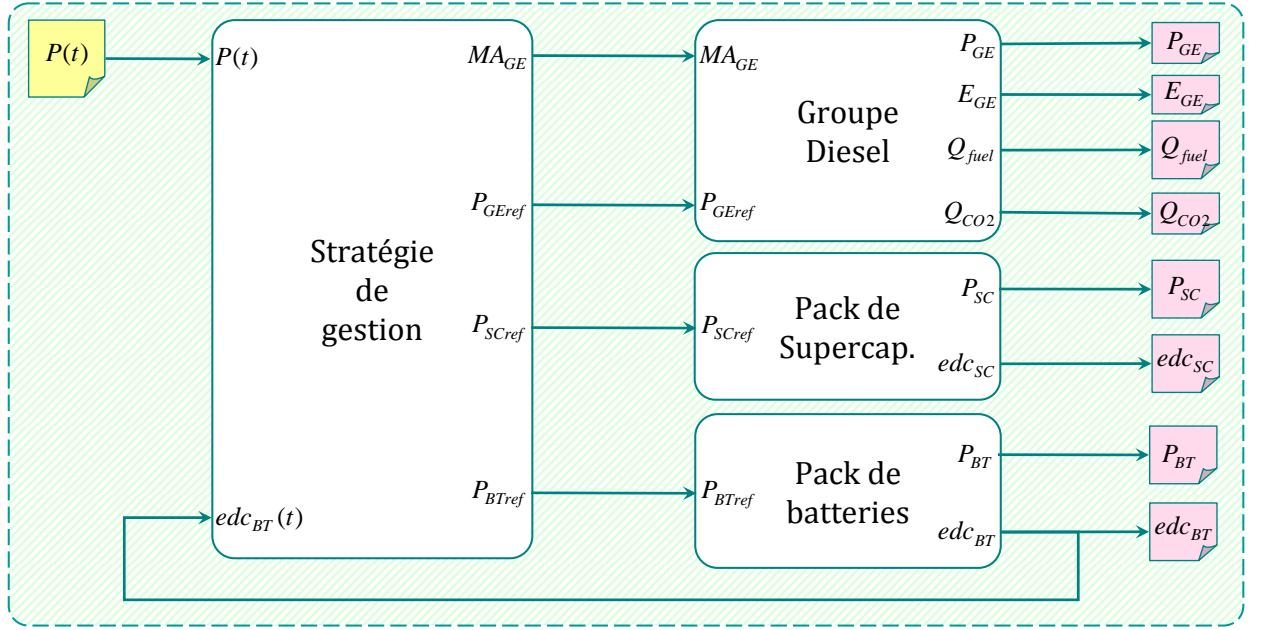


Fig. 4.6: Modèle d'analyse en flux de puissance global

De l'état "marche", si le temps de fonctionnement dmf s'est écoulé et qu'une demande de mise en arrêt est initiée par l'étage de décision, c'est-à-dire :

$$\text{si } t - d > dmf \text{ et } mar == 0 \quad (4.10)$$

le réseau de pétri bascule dans l'état "arrêt", en faisant l'action :

$$d = t \text{ et } MA_{GE} = 0 \quad (4.11)$$

4.1.5 Modèle d'analyse en flux de puissance global

Le modèle d'analyse en flux de puissance global de la locomotive est présenté à la figure 4.6. Chacun des blocs "sources" reçoit une consigne de puissance de référence, plus la consigne de marche/arrêt pour le groupe Diesel. En sortie, le modèle des packs de stockage produit la puissance fournie par le pack et son état de charge. Le modèle du groupe Diesel produit en sortie la puissance et l'énergie totale fournies par le groupe Diesel, la consommation de fuel et la quantité de CO_2 émise. Le bloc de gestion énergétique prend en entrée la mission de puissance et l'état de charge des batteries, pour calculer les consignes de puissance à l'endroit des sources. En comparaison au modèle de synthèse en flux de puissance de la figure 3.23 (page 75), le modèle d'analyse est bâti sur le même principe. Cependant, le modèle d'analyse semble plus complet et plus riche du fait de la présence des blocs de limitation des flux de puissance et surtout de la complexité du pilotage du groupe Diesel. En fait, les limitations des flux de puissance sont intégrées au processus de synthèse à travers la fonction de correction des missions mise en œuvre à la section 3.6.4 (86) et l'utilisation du processus de calcul de l'énergie par intégration saturée (cf B.2, 218). Par contre, il y a une différence notable entre la gestion du groupe Diesel dans le modèle de synthèse et celle mise en œuvre dans le modèle d'analyse. Cela s'explique par le fait

que certaines données telles la capacité de stockage des batteries, finalités du processus de synthèse, sont indispensables à la mise en œuvre d'une gestion affinée du groupe Diesel. A travers des exemples ciblés, nous proposons, dans cette sous-section, de discuter quelques aspects du comportement du modèle d'analyse.

◆ Butée d'énergie du pack de supercondensateurs

Une différence entre la consigne P_{SCref} et la sortie P_{SC} traduirait le fait que la fréquence de filtrage F_{SC} est trop faible et a entraîné une sur-sollicitation des supercondensateurs, qui ont donc failli. Comme le montre la figure 4.7, nous enregistrons des "défaillances" dans la réponse du pack de supercondensateurs. Il s'agit essentiellement de "défaillances" pour cause de butée d'énergie, car avec leur excellente densité de puissance, les supercondensateurs n'atteignent quasiment jamais leur butée de puissance.

◆ Butée d'énergie du pack de batteries

La figure 4.8 met en évidence quelques phénomènes intéressants. Il s'agit de la simulation de la mission m_{11} avec la configuration suivante : groupe Diesel choisi à 175 kW nominal de Diesel (soit 193 kW maximal), 2000 supercondensateurs et 1000 batteries. Théoriquement, cette configuration est trop juste pour passer la mission, mais elle permet de mettre en évidence certains comportements du système. La mission $P_{f,ref}$ représentée est la version filtrée à 2.8 mHz de la mission m_{11} c'est-à-dire la part de mission revenant au groupe Diesel et aux batteries. Dans l'ensemble, avec cette configuration, la mission est plus ou moins passée, sauf aux alentours de la 100^{ième} minute où une portion de la mission n'est pas passée. En effet, cette défaillance s'explique chronologiquement de la façon suivante :

- Comme le montre l'état de charge du pack de batteries, ces dernières ont été sollicitées pendant toute la première phase de la mission. Ce qui fait qu'aux alentours de 100 minutes de mission, l'état de charge des batteries a atteint la limite de 30%. En conséquence, les batteries arrêtent de participer à la mission globale.
- Le groupe étant désormais seul face à une mission qui dépasse sa puissance nominale, la gestion réagit en faisant monter le groupe à sa puissance maximale de 193 kW. Mais, même avec le groupe au maximum, la mission a manqué de puissance, d'où cette défaillance observée.

◆ Pilotage en marche/arrêt du groupe Diesel

En second lieu, la figure 4.8 met en évidence un avantage notable de l'hybridation. En effet, sur une locomotive, avec le groupe Diesel comme seule source, ce dernier doit rester en état de marche permanent, même lorsque la locomotive est en arrêt, pour fournir ne serait-ce que la puissance aux auxiliaires. Cela accroît la prédominance des phases de ralenti par rapport aux phases de sollicitations significatives (cf. figure 1.7, page 20). Or, sur une locomotive hybride, le dispositif de stockage introduit une certaine souplesse dans la gestion d'énergie : pendant les phases de faibles demandes avec les batteries pleines, le groupe Diesel est carrément éteint. C'est ce qui se produit aux alentours de 250 minutes de mission sur la figure 4.8. De plus, le groupe Diesel tourne plus souvent à sa puissance nominale, ce qui optimise sa consommation. Cet avantage permet un gain de consomma-

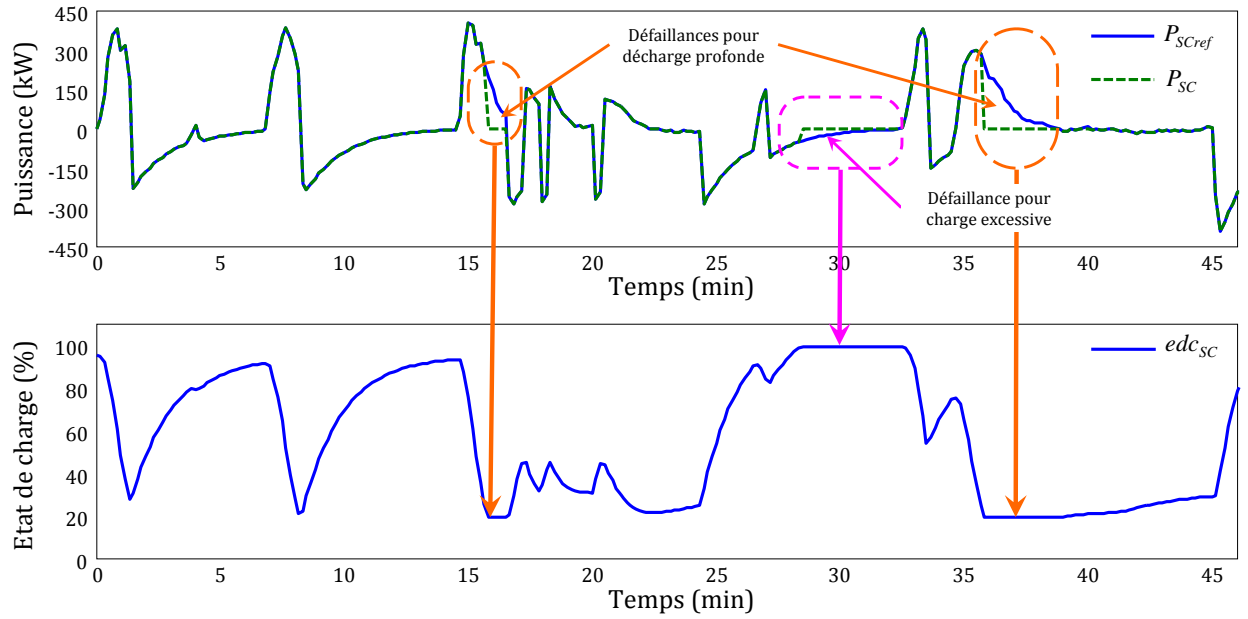


Fig. 4.7: Butée d'énergie pour fréquence de filtrage inadaptée

tion, de pollution et une réduction des nuisances sonores.

◆ La dégradation temporelle des missions

Pour finir avec la figure 4.8, notons qu'en fin de mission, alors que la demande est nulle, le groupe Diesel continue de tourner pour recharger les batteries et les ramener à leur état de charge initial : c'est ce que nous appelons "la dégradation temporelle des missions". Cette problématique est abordée, plus en détails, à la section 4.2.2.

Il nous semble important de préciser que la simulation du modèle d'analyse en flux de puissance se fait avec un pas de calcul d'une seconde (c'est le pas de mesure des missions de puissance) et coûte 1/4000 en temps de simulation, c'est-à-dire que la simulation est 4000 fois plus rapide que le temps réel. Cette rapidité du modèle en flux de puissance nous a permis de simuler pour les 4800 configurations (200 fréquences \times 24 groupes Diesel), les 12 heures de missions (les quinze missions du cahier des charges), soit au total 2400 jours de mission, en seulement 15 heures de simulation.

4.1.6 Conclusion

Dans cette section, nous avons présenté les modèles d'analyse en flux de puissance du groupe Diesel, du pack de batteries, du pack de supercondensateurs et de la stratégie de gestion. En plus de la prise en compte des pertes, déjà intégrée dans les modèles de synthèse étudiés au chapitre 3, ces modèles sont plus complets et plus détaillés. Ils intègrent notamment, le contrôle statique des niveaux de puissance admissible par les packs, le contrôle dynamique des puissances de charge et de décharge en fonction de l'état de charge des packs, le calcul de la consommation de fuel et des émissions de CO_2 , et surtout une version plus détaillée de la gestion énergétique fréquentielle. Les résultats

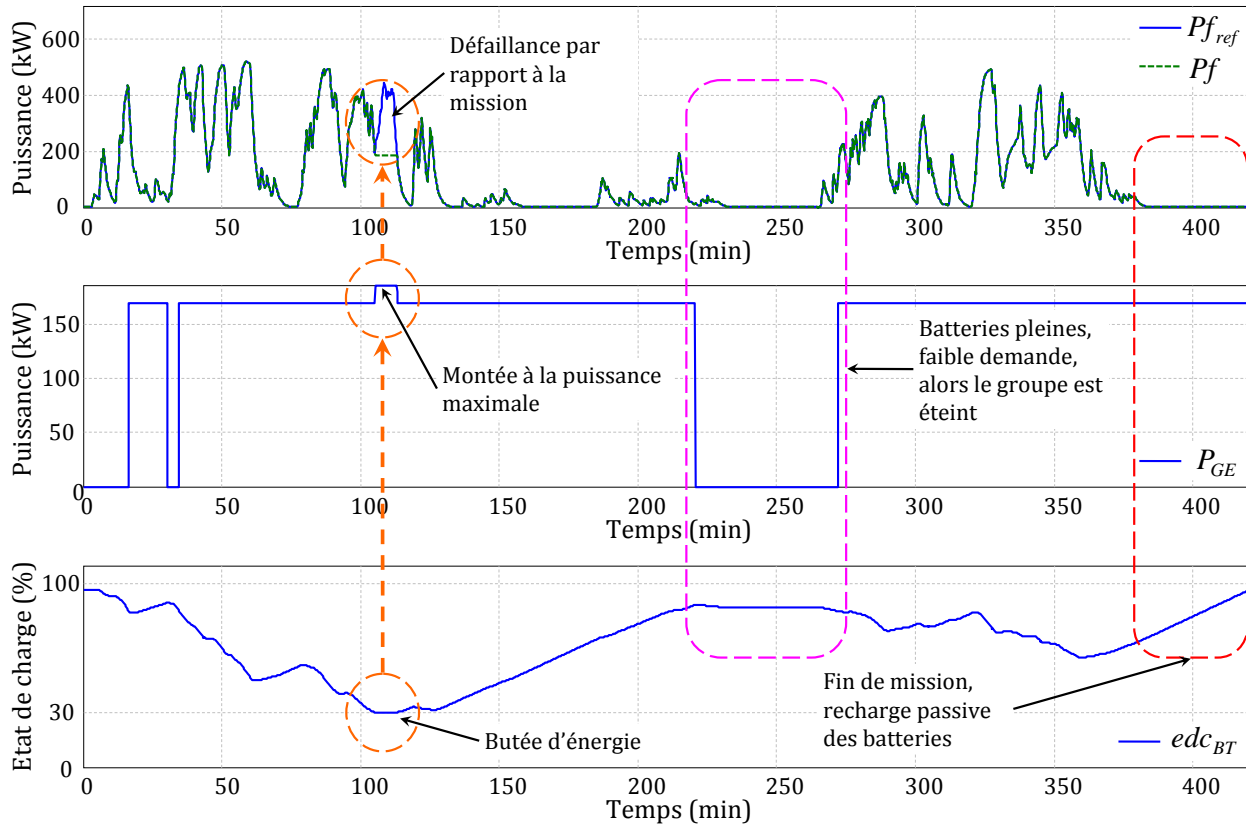


Fig. 4.8: Analyse du comportement du groupe Diesel et des batteries

de simulation montrés en exemple témoignent de la cohérence et de la pertinence de ces modèles. Les résultats de la simulation des configurations issues de la phase de synthèse nous ont amenés à élaborer les critères de faisabilité ayant permis d'analyser et de comparer ces configurations entre elles. La section qui suit présente la mise au point de ces critères de faisabilité.

4.2 Critères de faisabilité

Dans cette section, nous présentons les critères de faisabilité selon lesquels ont été analysées et comparées les différentes configurations issues du dimensionnement énergétique. Il s'agit, notamment, du volume du système, de la dégradation temporelle des missions, du coût d'investissement, de la consommation de fuel et de la durée de vie des batteries. Pour les trois premiers critères, la considération de l'unique mission dimensionnante m_{11} suffit à les étudier. Par contre, pour estimer la consommation et la durée de vie des batteries, nous allons considérer l'ensemble des quinze missions du cahier des charges. Mentionnons que dans cette section l'utilisation du terme "système"⁽¹⁾ se rapporte aux trois sources d'énergie et de puissance équipées de leurs convertisseurs et leur "packaging".

⁽¹⁾Ne pas confondre avec le système au sens plus large de la locomotive avec tous ses équipements.

4.2.1 Volume du système

L'estimation du volume du système intègre les éléments assemblés, les espaces nécessaires entre éléments pour éviter des surchauffes destructrices, les convertisseurs et les systèmes de refroidissement. Nous distinguons les volumes des sous-systèmes groupe Diesel, pack de batteries et pack de supercondensateurs.

◆ Volume du groupe Diesel

Globalement, le volume d'un groupe Diesel (moteur thermique, alternateur et système de refroidissement) dépend de la puissance qu'il peut délivrer. Mais la relation entre le volume et la puissance nominale du groupe Diesel n'est pas linéaire, car il arrive que le même moteur thermique serve à concevoir des groupes Diesel de puissances électriques nominales différentes. Par exemple, le même moteur thermique CURSOR 13 d'IVECO sert à concevoir les groupes Diesel CURSOR 13 TE1 de puissance électrique 263 kW et CURSOR 13 TE2 de puissance électrique 304 kW. Ce qui fait que ces deux groupes, capotés, font le même volume de 8.2 m³. Néanmoins, comme le montre la figure 4.9, une interpolation linéaire est possible avec une erreur relative de moins de 17%. Nous retenons l'équation d'interpolation suivante :

$$\text{Vol}_{\text{GE}} = 0.03 \times P_{\text{GEN}} + 0.09 \quad (4.12)$$

Le volume Vol_{GE} est exprimé en m³ et la puissance P_{GEN} est exprimée en kilowatt. Les données représentées à la figure 4.9 sont issues du catalogue en ligne de 2HEnergy⁽¹⁾.

◆ Volume des packs de batteries et de supercondensateurs

Le volume du pack de batteries compte les N_{BT} éléments de batteries, les convertisseurs et filtres associés et le système de refroidissement. De plus, pour assurer une bonne aération, sans risque de surchauffe, il est conseillé de laisser un espace de quelques centimètres entre les éléments. Une étude prospective auprès des spécialistes d'assemblage de batteries nous a permis d'établir une relation linéaire entre le volume du pack et le nombre de batteries.

$$\text{Vol}_{\text{BT}} = \lambda_{\text{BT}} \times N_{\text{BT}} \times \text{Vol}_{\text{BT}}^0 \quad (4.13)$$

Vol_{BT}^0 étant le volume d'un élément de batterie. Le paramètre λ_{BT} est un coefficient d'assemblage qui prend en compte l'extension de volume due aux espaces inter-éléments, au volume des convertisseurs et au volume du système de refroidissement. λ_{BT} peut s'écrire sous forme du produit de deux coefficients :

$$\lambda_{\text{BT}} = \lambda_{\text{BT,ass}} \times \lambda_{\text{BT,ext}} \quad (4.14)$$

$\lambda_{\text{BT,ass}}$ est le coefficient d'assemblage qui tient compte des espaces entre éléments et le volume de matière supplémentaire apportée par le châssis d'assemblage. $\lambda_{\text{BT,ext}}$ est le coefficient qui tient compte de l'extension de volume due aux convertisseurs et au système

⁽¹⁾2HEnergy est une filiale de IVECO Motors. Sur le site www.ivecomotors.com ne figurent que les encombrements du moteur thermique et du système de refroidissement. Nous avons complété ces données en rajoutant les encombrements de l'alternateur.

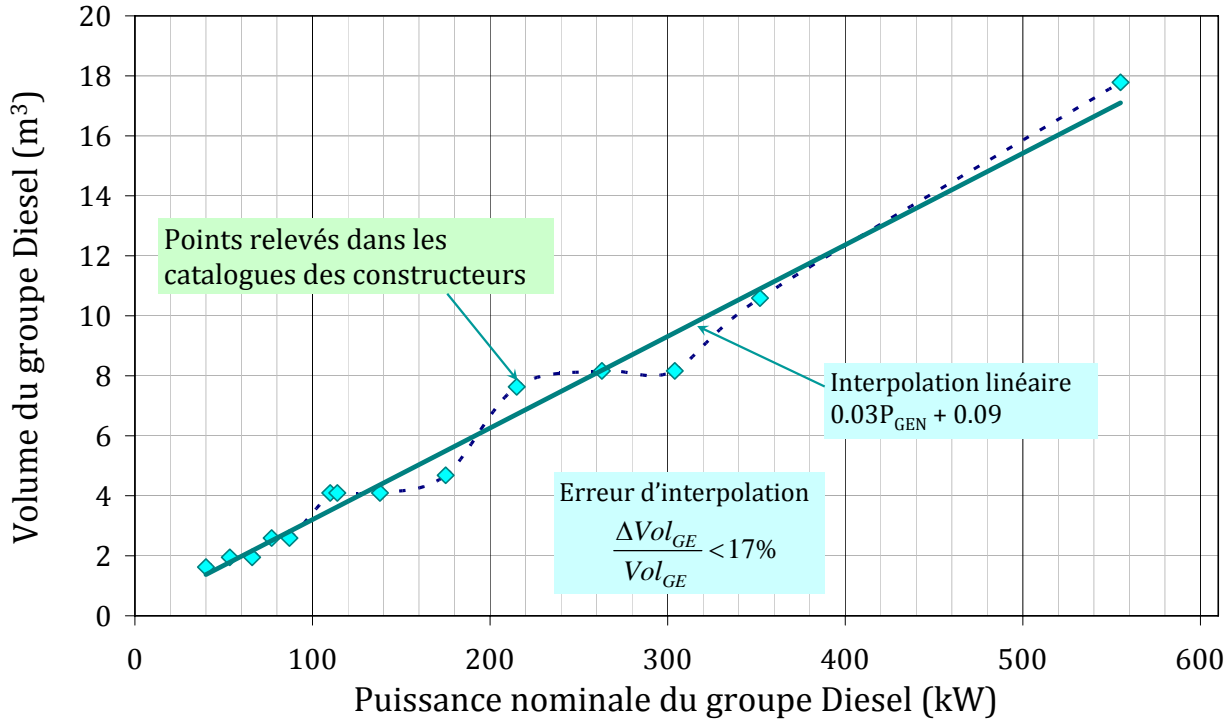


Fig. 4.9: Interpolation linéaire du volume du groupe Diesel en fonction de sa puissance nominale

de refroidissement. D'après une proposition d'assemblage de Hoppecke⁽¹⁾, 50 éléments de cellules de batteries de type FNC 1502HR (135 Ah) sont stockés dans un châssis d'encombrement 345 mm × 1365 mm × 792 mm. Sachant que la cellule fait 115 mm × 122 mm × 309 mm d'encombrement (cf. §C.2.1), nous obtenons :

$$\lambda_{BT,ass} = \frac{345\text{mm} \times 1365\text{mm} \times 792\text{mm}}{115\text{mm} \times 122\text{mm} \times 309\text{mm} \times 50} = 1.71 \quad (4.15)$$

L'estimation de $\lambda_{BT,ext}$ n'est pas évidente, car il est difficile d'estimer le volume des convertisseurs et du système de refroidissement avec les données dont nous disposons à ce stade. En se basant sur l'expérience de la SNCF dans le domaine des batteries, nous avons estimé approximativement ce coefficient à 1.1. En d'autres termes, les convertisseurs et le système de ventilation font 10% du volume des batteries. Ce qui donne :

$$\lambda_{BT} = \lambda_{BT,ass} \times \lambda_{BT,ext} = 1.71 \times 1.1 = 1.9 \quad (4.16)$$

Quant au pack de supercondensateurs, la détermination de son volume est analogue à celle du volume des batteries. Nous avons établi, avec l'aide de EPCOS⁽²⁾ qui nous a proposé un pack de 200 éléments de supercondensateurs 5000 F/2.5 V (0.99 L par élément) dans un châssis faisant 468 mm × 792 mm × 1150 mm, que le coefficient d'assemblage vaut :

$$\lambda_{SC,ass} = 2.15 \quad (4.17)$$

⁽¹⁾Producteur de batteries.

⁽²⁾Producteur de supercondensateurs.

Sur la base des informations données par ERCTEEL⁽¹⁾, nous avons établi :

$$\lambda_{SC,ext} = 1.2 \quad (4.18)$$

D'où :

$$\lambda_{SC} = \lambda_{SC,ass} \times \lambda_{SC,ext} = 2.15 \times 1.2 = 2.58 \quad (4.19)$$

Remarquons au passage que les supercondensateurs, du fait de leur forme cylindrique (cf. §C.2.2) ont un coefficient d'assemblage plus important que les batteries qui ont un profil plutôt rectangulaire.

De tout ce qui précède, nous déduisons l'expression du volume du système, pour une configuration $(P_{GEN}, N_{BT}, N_{SC})$, par :

$$Vol_{\Sigma} = Vol_{GE} + Vol_{BT} + Vol_{SC} \quad (4.20)$$

Soit :

$$Vol_{\Sigma} = 0.03 \times P_{GEN} + 0.09 + \lambda_{BT} \times N_{BT} \times Vol_{BT}^0 + \lambda_{SC} \times N_{SC} \times Vol_{SC}^0 \quad (4.21)$$

Soit encore, pour des packs de batteries de type FNC 1502HR (135 Ah) faisant 4.33 L l'unité et de supercondensateurs de type EPCOS 5000 F/2.5 V faisant 0.99 L l'unité :

$$Vol_{\Sigma}(\text{en m}^3) = 0.03 \times P_{GEN} + 8.2e^{-3} \times N_{BT} + 2.66e^{-3} \times N_{SC} + 0.09 \quad (4.22)$$

4.2.2 Dégradation temporelle

Comme nous l'avons souligné plus haut, l'un des principes du véhicule hybride autonome est que le bilan énergétique du système de stockage est nul, aux pertes près. Ce principe implique que la mission dépend, non seulement du besoin $P(t)$ spécifié par le cahier des charges, mais aussi du recouvrement de l'état initial des éléments de stockage. Ce principe garantit par ailleurs, que toute l'énergie nécessaire à la mission est bien fournie par le groupe Diesel⁽²⁾. La mise en oeuvre de ce principe entraîne le prolongement de la mission au-delà de sa phase de traction, par une phase passive de recharge des batteries⁽³⁾. La figure 4.10 est le résultat de simulation de la mission de référence m_{11} , avec le jeu de paramètres : $N_{SC} = 3730$ (soit $F_{SC} = 2.2 \text{ mHz}$), $N_{BT} = 3030$, $P_{GEN} = 150 \text{ kW}$. Le pack de batteries est initialement chargé à 95%. Au bout des 6 h 30 min de mission, l'état de charge edc_{BT} est de 67%. La mission se prolonge alors sur plus de 75 min, pendant lesquelles le groupe tourne constamment à 150 kW pour uniquement recharger les batteries et les ramener à leur état initial de 95%. Soit d_{trac} la durée de la phase de traction de la mission et d_{eff} la durée effective, à l'issue de la recharge passive des batteries. L'indicateur de dégradation temporelle s'écrit :

⁽¹⁾Société française spécialisée dans l'intégration des supercondensateurs, pour les systèmes embarqués.

⁽²⁾Cette condition est indispensable à la pertinence de la comparaison des solutions selon le critère de consommation.

⁽³⁾Le retour au niveau initial de l'état de charge des supercondensateurs est automatiquement assuré par la gestion fréquentielle.

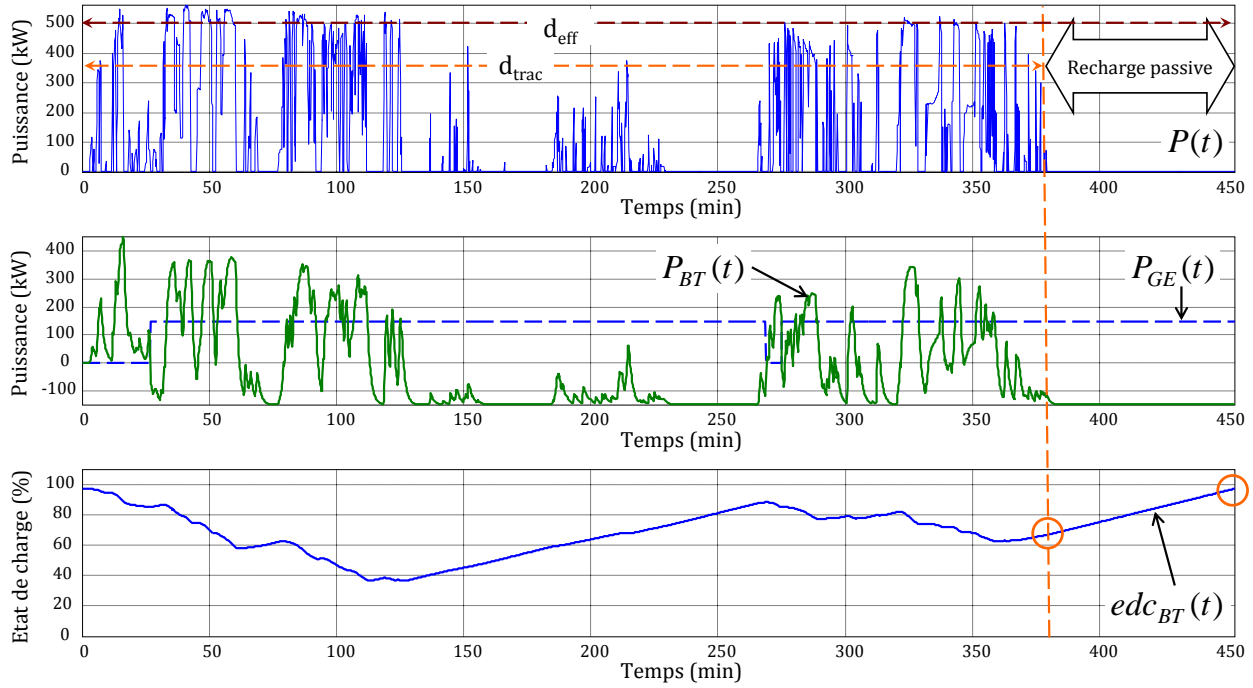


Fig. 4.10: Mise en évidence de la dégradation temporelle

$$\text{Ind}_{DT} = \frac{d_{\text{eff}} - d_{\text{trac}}}{d_{\text{trac}}} \quad (4.23)$$

Dans le cas de l'exemple de la figure 4.10, la dégradation temporelle vaut 20%.

4.2.3 Coût financier du système

Normalement, le coût financier du système intègre le coût initial des éléments, le coût de développement, l'amortissement des éléments et le coût d'exploitation (carburant compris). Mais à ce stade de la conception, il est difficile de prendre en compte tous ces aspects. Nous y reviendrons plus largement au chapitre 6. Dans ce chapitre-ci, il est question uniquement du coût initial des sources et de l'estimation des coûts de mise en œuvre (assemblage et convertisseurs).

♦ Coût financier du groupe Diesel

Globalement, le coût financier d'un groupe Diesel (moteur thermique, alternateur et système de refroidissement) dépend de la puissance qu'il peut délivrer. En plus du coût catalogue, il faut ajouter les frais de mise en œuvre (capotage, filtre à particules, modifications pour intégration sur une locomotive,...). Une recherche sur catalogue nous a permis d'établir, par interpolation, comme le montre la figure 4.11, avec moins de 15% d'erreur, la relation suivante, entre le coût standard (sans prestations) et la puissance nominale :

$$\text{Cout}_{\text{ge, std}} = 0.121 \times P_{\text{GEN}} + 6.274 \quad (4.24)$$

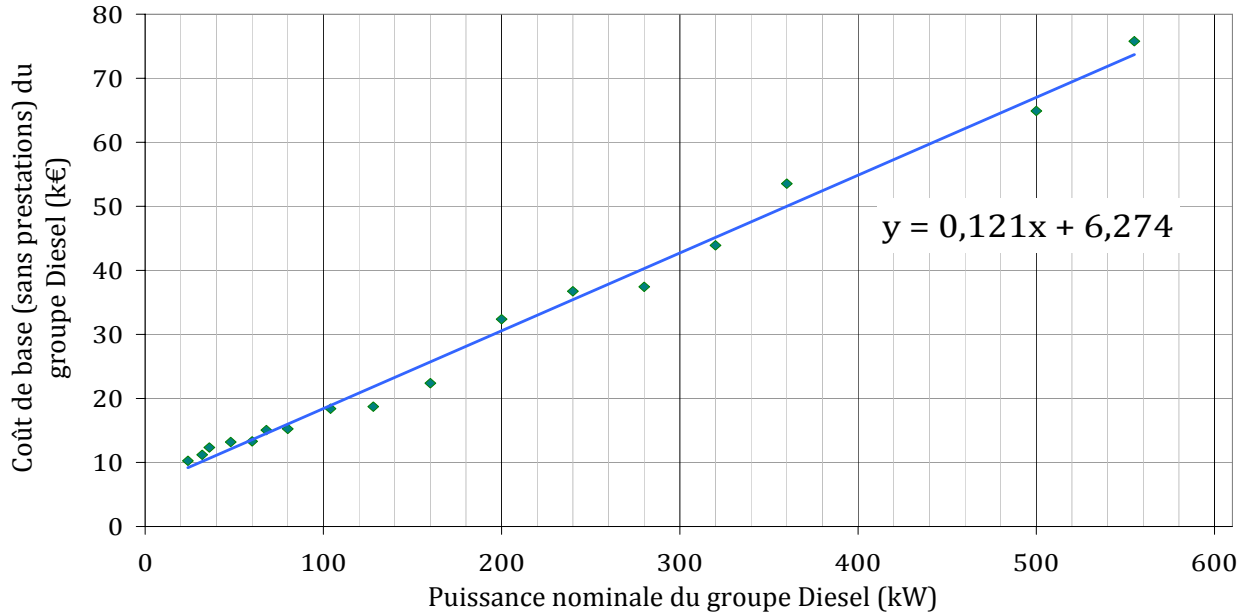


Fig. 4.11: Coût standard (sans prestations) du groupe Diesel en fonction de la puissance

$\text{Cout}_{\text{ge,std}}$ est en k€ et P_{GEN} en kW.

En considérant les prestations pour un groupe de 250 kW, le coût complet passe de 36.74 k€ à 85 k€. Nous pouvons alors généraliser l'expression du coût complet par :

$$\text{Cout}_{\text{GE}} = \alpha_{\text{ge,cout}} \times \text{Cout}_{\text{ge,std}} \quad (4.25)$$

Avec $\alpha_{\text{ge,cout}} = 85000/36740 = 2.31$. D'où :

$$\text{Cout}_{\text{GE}} = 0.28 \times P_{\text{GEN}} + 14.5 \quad (4.26)$$

Nous précisons que ces relations ne sont valables que localement (entre 50 kW et 600 kW). Il n'est pas question de les généraliser à d'autres gammes de puissance.

◆ Coût financier du pack de batteries et du pack de supercondensateurs

Le coût, assemblage compris, d'un pack de 290 éléments de batteries FNC 1502 HR (135 Ah) est de 66.200 k€. Le coût standard, assemblage compris, du pack peut s'écrire :

$$\text{Cout}_{\text{bt,std}} = 0.228 \times N_{\text{BT}} \quad (4.27)$$

Une estimation sur la base d'un hacheur de trois bras⁽¹⁾ nous a permis d'estimer le coût du convertisseur pour un pack de 290 éléments à 5 k€ environ. Ce qui correspond à une extension de coût, par rapport au pack assemblé sans convertisseur, de $\alpha_{\text{bt,cout}} = (66.2+5)/66.2 = 1.07$. Nous pouvons alors écrire :

$$\text{Cout}_{\text{BT}} = \alpha_{\text{bt,cout}} \times \text{Cout}_{\text{bt,std}} \quad (4.28)$$

⁽¹⁾ IGBT-Dual FF450R12ME3 (3×96€), Driver 2ED300C17ST (3×73€), carte MA-Econodual (3×19.6€), inductance (3×500€) : soit 2065 € par convertisseur. En considération une extension de coût de 2.31 pour le développement et l'intégration, nous obtenons 4770 €. Grosso modo, nous avons estimé le coût du convertisseur pour un pack de 290 éléments à 5 k€.

Soit :

$$\text{Cout}_{\text{BT}}(\text{en k€}) = 0.244 \times N_{\text{BT}} \quad (4.29)$$

De même, en tenant compte du prix unitaire de 140€ du supercondensateur 5000 F/2.5 V, nous avons établi :

$$\text{Cout}_{\text{SC}} = \alpha_{\text{sc,cout}} \times \text{Cout}_{\text{sc,std}} \quad (4.30)$$

Soit :

$$\text{Cout}_{\text{SC}}(\text{en k€}) = 0.150 \times N_{\text{SC}} \quad (4.31)$$

Le coût global du système ($N_{\text{SC}}, N_{\text{BT}}, P_{\text{GEN}}$) s'écrit :

$$\text{Cout}_{\Sigma} = \text{Cout}_{\text{GE}} + \text{Cout}_{\text{BT}} + \text{Cout}_{\text{SC}} \quad \text{avec :} \quad \begin{cases} \text{Cout}_{\text{GE}}(\text{en k€}) = 0.28 \times P_{\text{GEN}} + 14.5 \\ \text{Cout}_{\text{BT}}(\text{en k€}) = 0.244 \times N_{\text{BT}} \\ \text{Cout}_{\text{SC}}(\text{en k€}) = 0.150 \times N_{\text{SC}} \end{cases} \quad (4.32)$$

Soit :

$$\text{Cout}_{\Sigma}(\text{en k€}) = 0.28 \times P_{\text{GEN}} + 14.5 + 0.244 \times N_{\text{BT}} + 0.150 \times N_{\text{SC}} \quad (4.33)$$

Il faut évidemment considérer ces coûts comme des tendances très approximatives. Le développement des filières industrielles (effet de nombre) notamment autour du véhicule électrique pur ou hybride est susceptible d'engendrer de fortes évolutions.

4.2.4 Consommation de fuel

L'estimation du critère de consommation pose deux difficultés majeures. D'une part, sur les 24 possibilités de groupe Diesel, nous ne disposons que d'une cartographie de consommation (celle du groupe de 215 kW). D'autre part, contrairement aux autres critères qui ne nécessitent que la prise en compte de la mission dimensionnante m_{11} , la consommation n'a de sens que si elle est rapportée à l'ensemble, éventuellement pondéré, des missions. Ce qui implique une simulation pour chacune des quinze missions du cahier des charges, par configuration.

Pour contourner la dernière difficulté, nous considérons que chacune des missions a la même probabilité d'occurrence, ce qui règle le problème de la pondération des missions. Nous simulons séparément chacune des quinze missions, pour 4800 configurations possibles. La consommation totale de fuel Q_{tfuel} est rapportée à l'énergie totale Q_{tenj} consommée par les missions, pour donner l'indicateur de consommation de fuel⁽¹⁾.

$$\text{Ind}_{\text{CF}} = \frac{Q_{\text{tfuel}}}{Q_{\text{tenj}}} \quad (4.34)$$

⁽¹⁾L'indicateur de consommation de fuel est équivalent à une consommation spécifique, c'est-à-dire le coût en litre (ou en g) de fuel, du kilowatt-heure d'énergie.

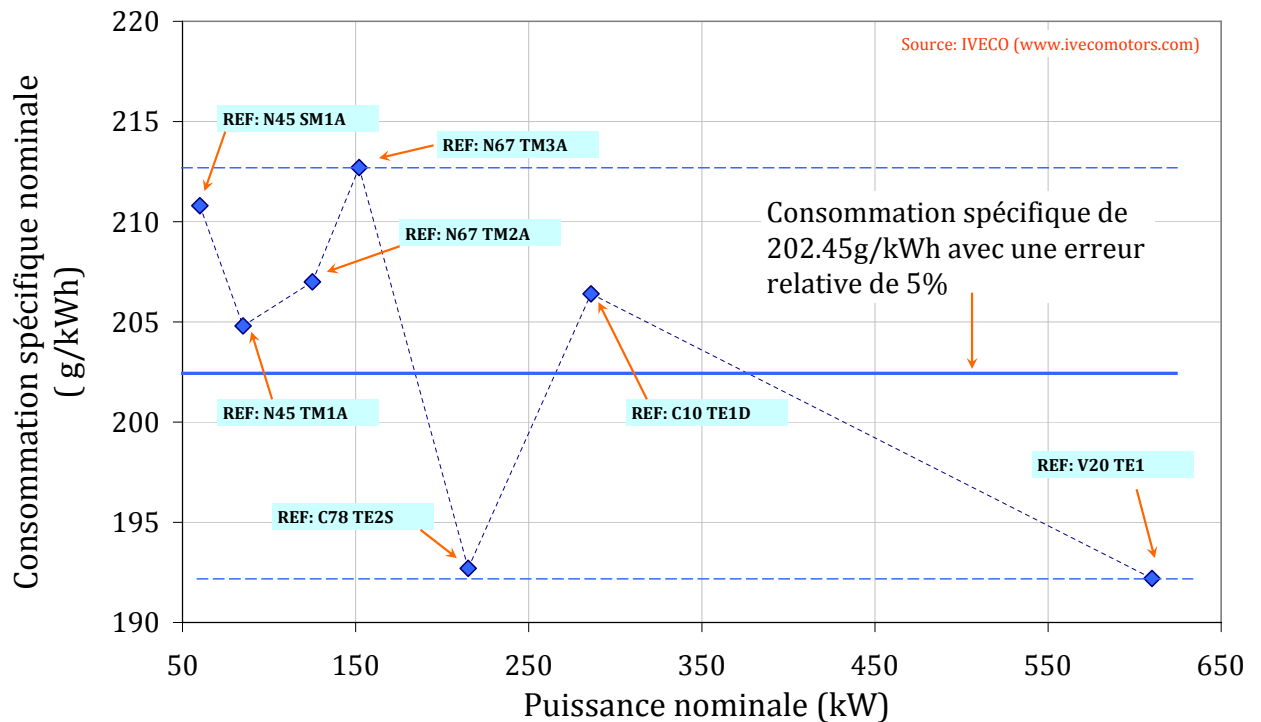


Fig. 4.12: Consommation spécifique nominale de quelques groupes Diesel

Reste à résoudre le problème des cartographies manquantes. Pour résoudre ce problème, nous avons procédé à une extrapolation. Notre raisonnement se base sur l'hypothèse suivante :

Hypothèse: Nous considérons que le "motif" de consommation spécifique adimensionnel⁽¹⁾ $C_S(\text{en } \%C_{Sn}) \rightarrow P_{GE}(\text{en } \%P_{GEN})$ est commune à tous les groupes Diesel concernés par cette étude. Ainsi, connaissant la cartographie complète d'un groupe et la consommation spécifique nominale des autres, nous pouvons déterminer l'ensemble des cartographies manquantes.

Dans la réalité, les choses sont beaucoup plus compliquées : d'une part, au ralenti, un grand groupe Diesel consomme beaucoup plus d'un petit et d'autre part, lorsqu'on change de technologie ou de réglages, le motif de consommation spécifique adimensionnel des moteur thermique peut changer. Néanmoins, nous pouvons minimiser les effets du changement de technologie en ne considérant que des groupe Diesel d'une même technologie avec des réglages identiques. Par ailleurs, sachant que la gestion énergétique fréquentielle réduit les phases de ralenti du groupe Diesel, nous estimons que l'erreur sur la consommation au ralenti a un effet relativement faible sur la consommation globale.

◆ Consommation spécifique nominale

La consommation spécifique nominale d'un groupe Diesel dépend des réglages de ce dernier. Or, selon l'utilisation à laquelle ils sont destinés les groupes Diesel ont des réglages

⁽¹⁾Il s'agit d'une notion que nous avons introduite pour faciliter le traitement du problème des cartographies manquantes. Il s'agit de la cartographie de consommation ramenée à dans un repère adimensionnel. Cette notion est explicitée plus bas.

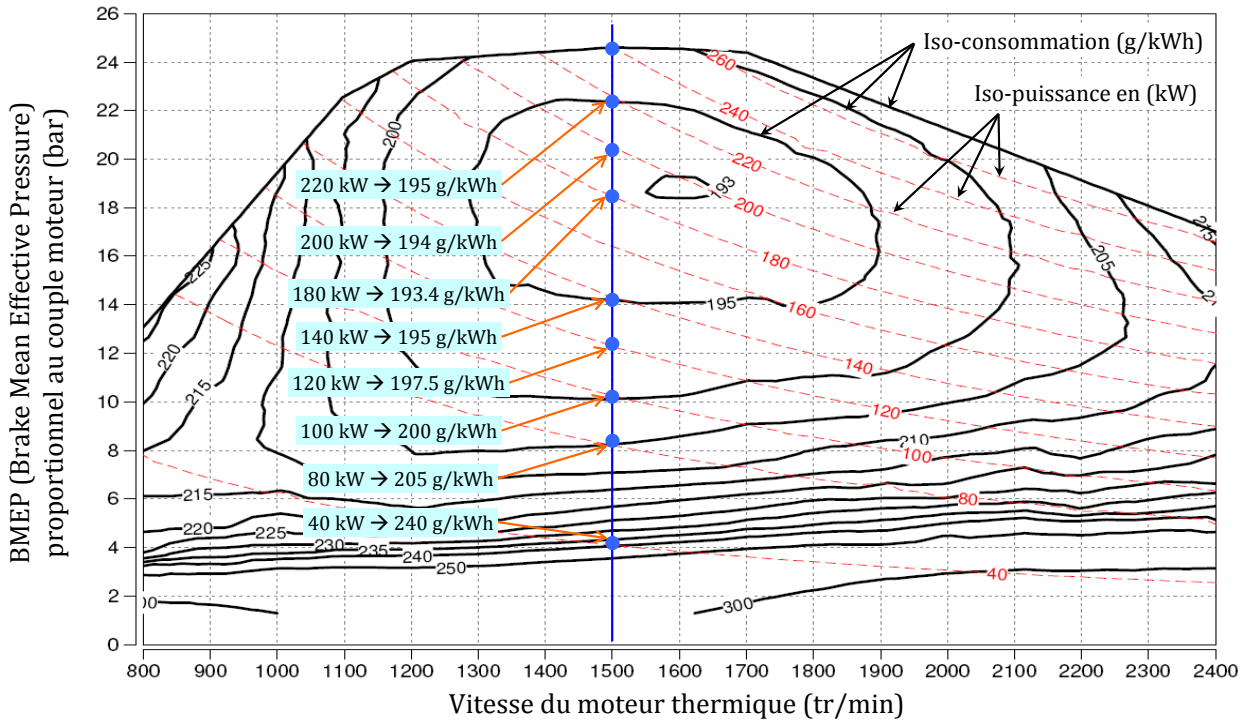


Fig. 4.13: Cartographie de consommation d'un groupe Diesel de 215 kW électrique

très différents : Les locomotives Diesel passant beaucoup de temps au ralenti embarquent des groupes Diesel réglés de façon à optimiser leur fonctionnement au ralenti. Les données disponibles dans les catalogues des constructeurs montrent qu'il n'existe aucune relation entre la taille du groupe Diesel et sa consommation spécifique nominale. Sur le site internet de 2HEnergy⁽¹⁾, pour les moteurs thermiques entre 60 kW et 610 kW, la consommation spécifique nominale évolue de façon dispersée entre 192.2 g/kWh et 212.7 g/kWh. Comme le montre la figure 4.12, nous pouvons considérer une consommation spécifique moyenne de 202.45 g/kWh (avec une erreur relative de 5%).

◆ Motif de consommation spécifique adimensionnel

Considérons l'exemple de la cartographie de consommation d'un groupe Diesel de 215 kW électrique. Cette cartographie est donnée à la figure 4.13. Afin d'alléger la démarche d'extrapolation, nous considérons un fonctionnement en régime constant à 1500 tr/min. Les données de la cartographie nous permettent d'établir la courbe de consommation de la figure 4.14. Nous normalisons la consommation spécifique C_s par sa valeur au point nominal (C_{Sn}) et la puissance fournie par la puissance nominale. Ce qui donne deux grandeurs adimensionnelles γ_{csr} et γ_{pfr} que nous appelons respectivement : consommation spécifique réduite et puissance fournie réduite.

$$\begin{cases} \gamma_{csr} = \frac{C_s}{C_{Sn}} \\ \gamma_{pfr} = \frac{P_{GE}}{P_{GEN}} \end{cases} \quad (4.35)$$

⁽¹⁾Filiale d'IVECO : www.ivecomotors.com

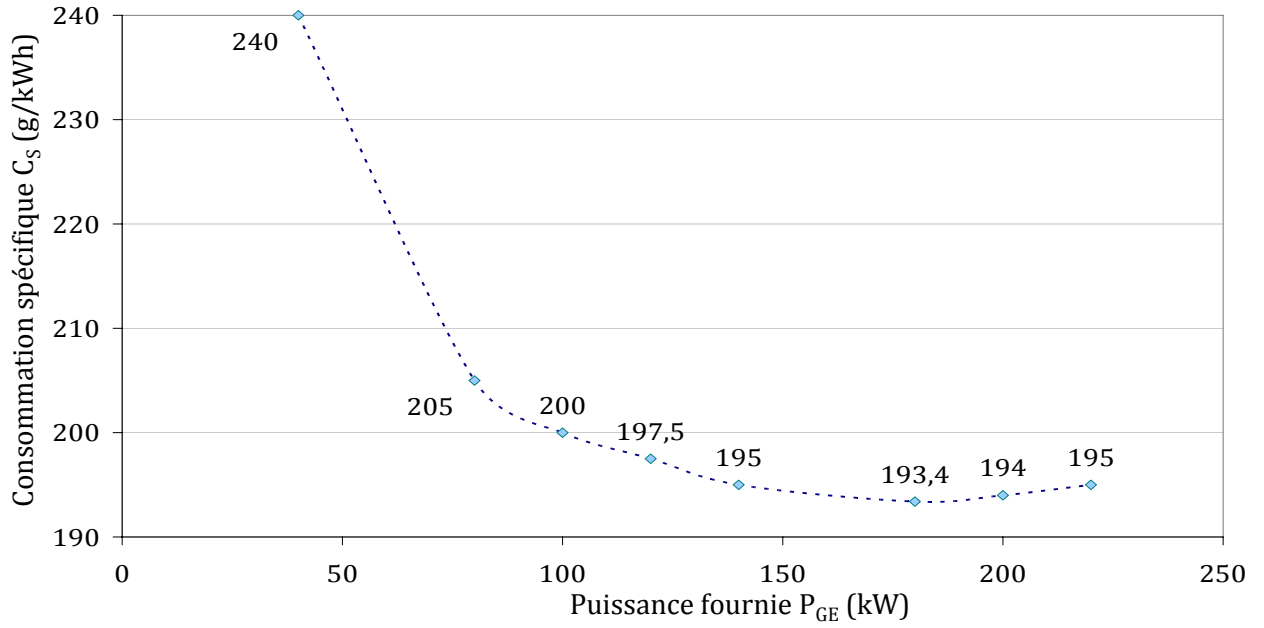


Fig. 4.14: Courbe de consommation à régime constant d'un groupe de 215 kW

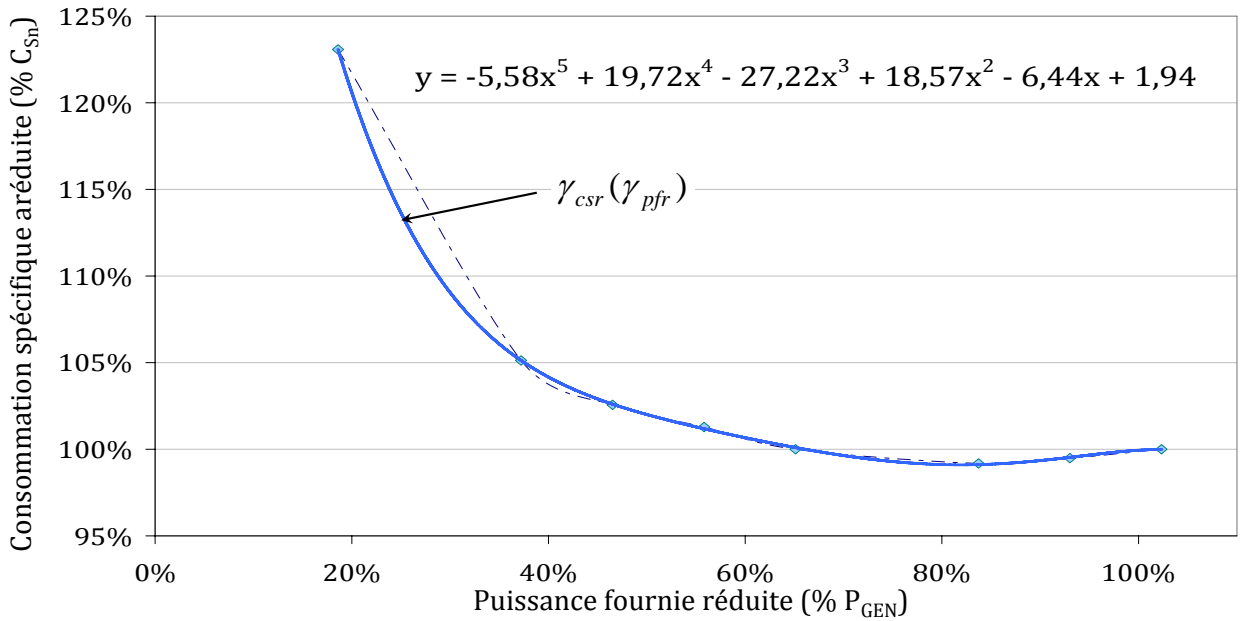


Fig. 4.15: Motif de consommation spécifique adimensionnel d'un groupe de 215 kW

La figure 4.15 montre le tracé de γ_{csr} en fonction de γ_{pfr} ; c'est cette courbe que nous appelons "motif de consommation spécifique adimensionnel". D'après l'hypothèse faite plus haut, cette courbe est identique pour tous les groupes Diesel concernés par notre étude. Il va de soi que la réalité est légèrement différente, mais cette hypothèse nous permet de contourner le manque de données. Il convient néanmoins de montrer sur quelques autres exemples, que cette hypothèse n'est pas absurde. Notons pour la suite, que le "motif" adimensionnel de la figure 4.16 est assimilable à un polynôme de degré 5.

$$\gamma_{csr} = -5.58(\gamma_{pfr})^5 + 19.72(\gamma_{pfr})^4 - 27.22(\gamma_{pfr})^3 + 18.57(\gamma_{pfr})^2 - 6.44\gamma_{pfr} + 1.94 \quad (4.36)$$

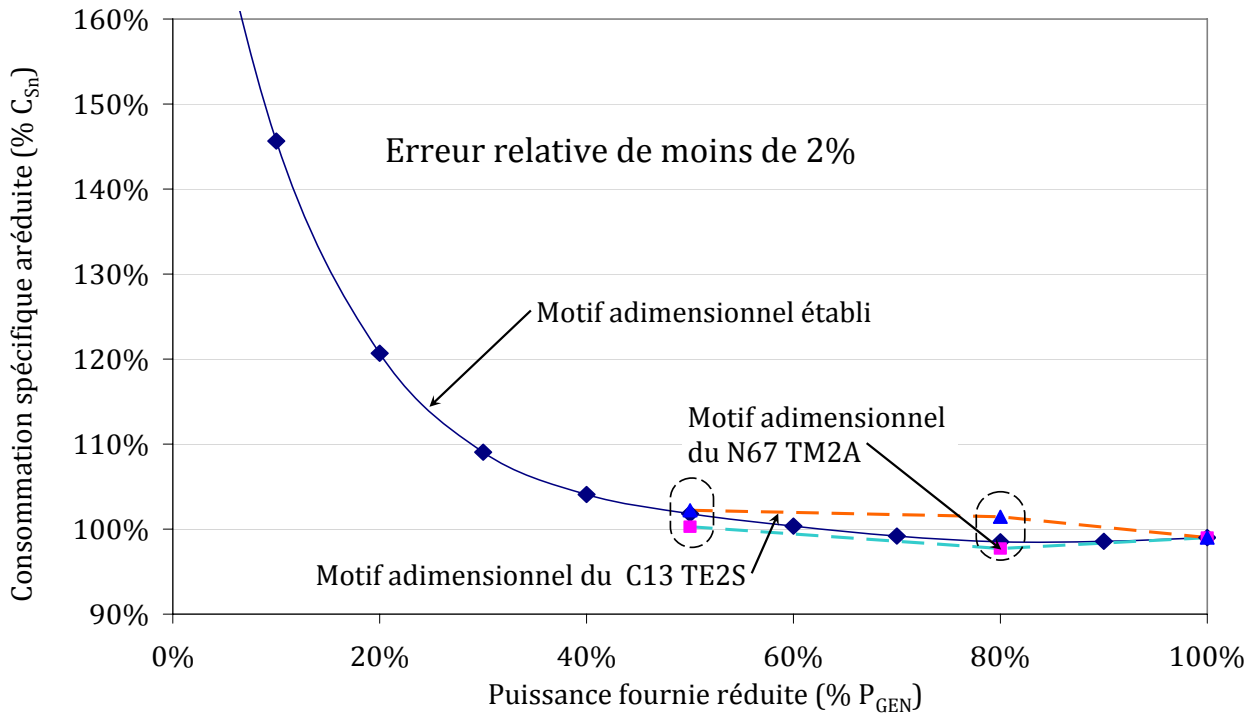


Fig. 4.16: Validation du motif adimensionnel sur deux groupe Diesels témoins

Ou plus simplement : Nous écrivons littéralement :

$$\gamma_{csr} = \sum_{i=0}^{i=5} b_i \cdot (\gamma_{pfr})^i \quad (4.37)$$

avec : $b_0 = 1.94$, $b_1 = -6.44$, $b_2 = 18.57$, $b_3 = -27.22$, $b_4 = 19.72$, $b_5 = -5.58$

Considérons les groupes Diesel d'IVECO N67 TM2A de 125 kW et C13 TE2S de 335 kW, dont nous connaissons les consommations au point de puissance 100%, 80%, et 50%⁽¹⁾. La figure 4.16 montre les écarts entre le motif adimensionnel et les points de consommation de ces deux groupes. Nous obtenons une erreur relative de moins de 2%. En toute rigueur, la validité du motif adimensionnel n'est prouvée que pour des niveaux de puissance entre 50 et 100%. Mais, faute de données complémentaires, nous étendons sans aucune justification supplémentaire cette validité, à l'intervalle 0% à 100%. Nous considérons qu'étant donné que le motif adimensionnel est issu de données réelles concernant un groupe de 215 kW et qu'il coïncide, à 2% près, aux données réelles des groupes Diesel de 125 et 335 kW, ce motif est suffisamment vraisemblable pour être utilisé pour l'estimation de la consommation des groupes étudiés dans ce rapport.

Au final, avec la consommation spécifique nominale moyenne estimée avec une tolérance de 5% à $C_{Sn} = 202.45 \text{ g/kWh}$ et avec l'hypothèse du "motif" adimensionnel de consommation spécifique unique, nous pouvons déduire la courbe de consommation pour tous les

⁽¹⁾Ces données sont disponibles sur le site internet de IVECO Motor www.ivecomotors.com.

groupes Diesel considérés dans ce projet. D'après les équations Eq.4.35 et Eq.4.37, nous avons :

$$\frac{C_S(P_{GE})}{C_{Sn}} = \sum_{i=0}^{i=5} b_i \cdot \left(\frac{P_{GE}}{P_{GEN}} \right)^i \quad (4.38)$$

Soit :

$$C_S(P_{GE}) = \sum_{i=0}^{i=5} c_i \cdot (P_{GE})^i \quad (4.39)$$

avec : $c_i = \frac{b_i \cdot C_{Sn}}{P_{GEN}^i}$

4.2.5 Durée de vie des batteries

Les batteries sont les éléments les plus fragiles du système d'une part, à cause de leur durée de vie assez limitée et d'autre part, à cause de leur coût élevé. De plus, l'environnement, surtout la température ambiante, a un effet important sur leur durée de vie [3]. Pour ce qui nous concerne, dans cette phase de conception, nous supposons que les batteries sont équipées de système de ventilation qui garantit une bonne température de fonctionnement. Les limitations de courant de charge et de décharge étant respectées, le seul facteur d'influence de la durée de vie des batteries reste la profondeur de décharge et le nombre de cycles [42, 43, 44, 45].

◆ Nombre de cycles disponibles en fonction de la profondeur de décharge

La figure 4.17 montre un réseau de courbes expérimentales donnant le nombre de cycles

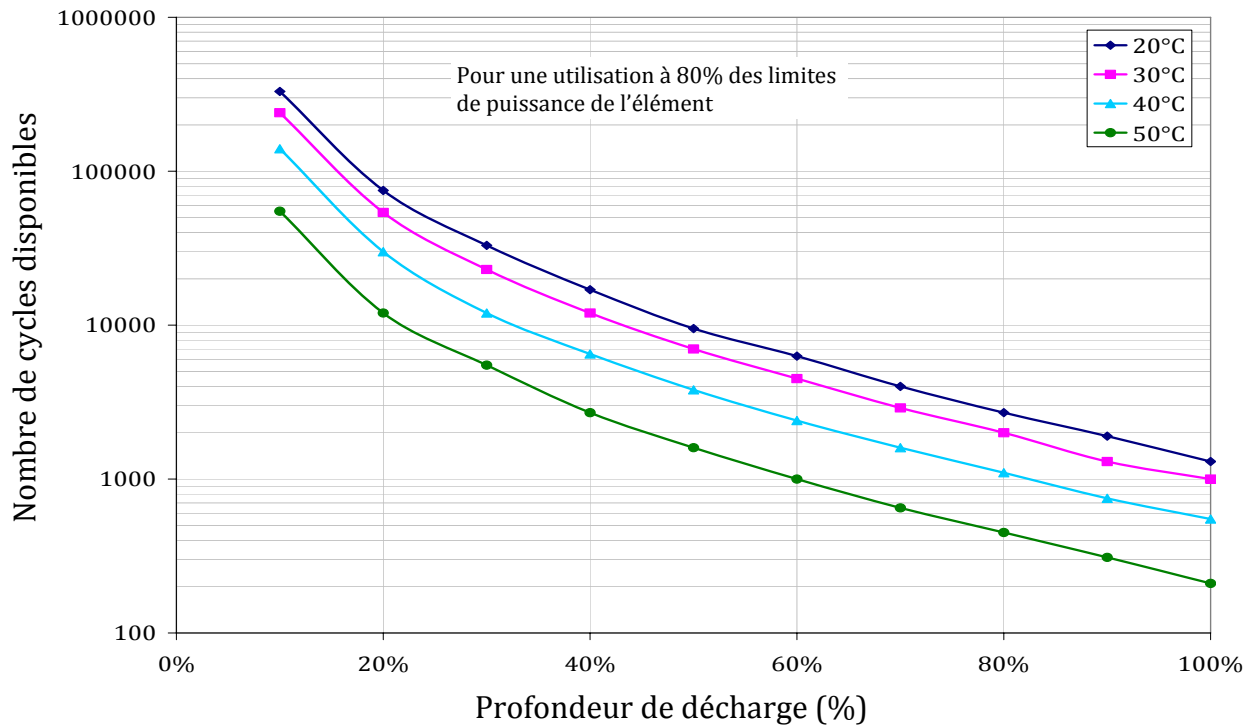


Fig. 4.17: Graphe expérimental de durée de vie d'une cellule NIMH

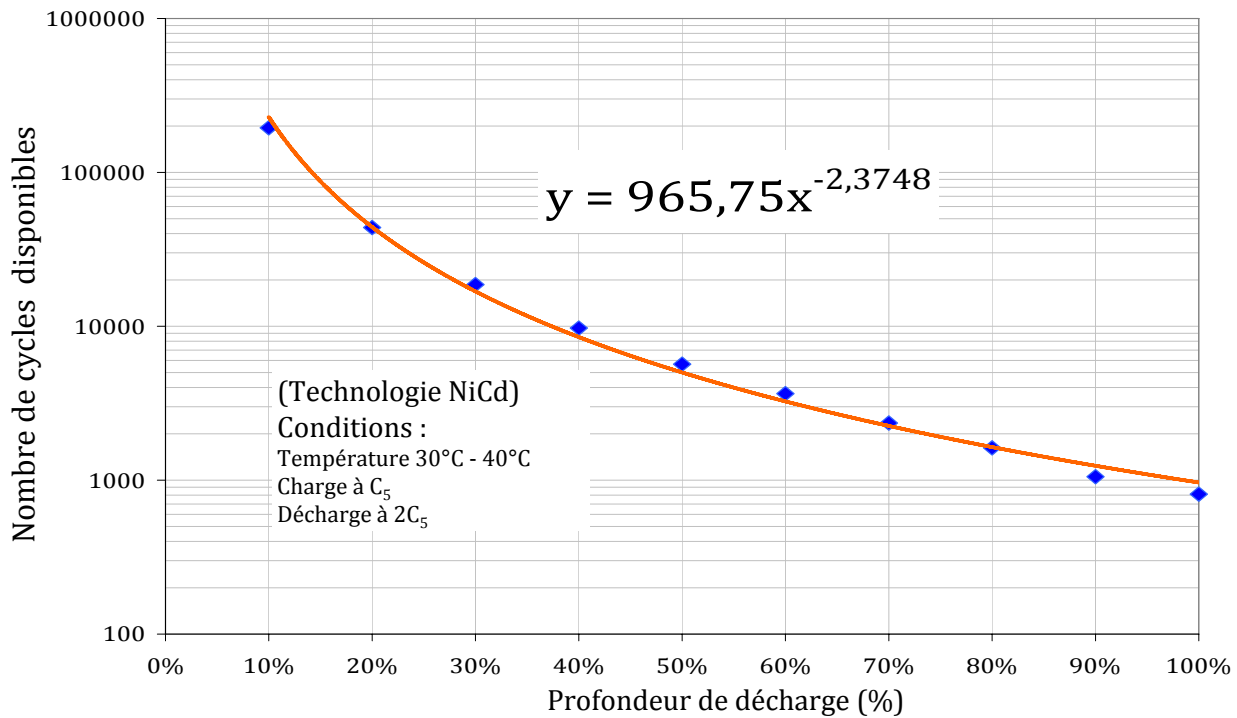


Fig. 4.18: Graphe théorique de durée de vie d'une cellule NiCd

disponibles dans une cellule de batterie de type NiMH, en fonction de la profondeur de décharge des cycles et de la température. Ces courbes sont fournies par un fabricant de batteries⁽¹⁾.

Dans son article "*Optimal battery/ultracapacitor storage combination*" paru en janvier 2008, William Henson [46] a établi que, quelle que soit la technologie de batterie, le nombre de cycles disponibles C_F ("cycles to failure") pour une profondeur de décharge DoD donnée s'écrit :

$$C_F = a_1 + a_2 \cdot e^{a_3 \cdot \text{DoD}} \quad (4.40)$$

Mais pour des raisons de stratégie commerciale les fabricants refusent de donner les paramètres de ce modèle. Le recoupement de données extraites des articles de William Henson [46] et A.J. Ruddella [45] et des données disponibles sur le site du distributeur américain *DC Battery Specialists*⁽²⁾ nous a permis d'établir la courbe théorique de durée de vie d'une cellule NiCd. Cette courbe est montrée à la figure 4.18. La validité de cette courbe n'est pas expérimentalement établie : par exemple le nombre de cycles de 80% disponible sur le graphe est de 1800, ce qui est assez proche des prédictions de 2000 cycles de 80% garanties par Hoppecke. L'erreur relative en ce point est de 10%. La fonction d'interpolation du graphe de durée de vie des cellules NiCd s'écrit :

$$C_F(\text{DoD}) = 966 \times \text{DoD}^{-2.37} \quad (4.41)$$

⁽¹⁾Pour des raisons de confidentialité, nous taillons le nom du fabricant.

⁽²⁾*DC Battery Specialists* : www.dcbattery.com

Par exemple, à $\text{DoD} = 1$ (100%), le nombre de cycles disponibles vaut : $C_F = 966$ cycles. Considérons la notion de "cycle-entier" comme étant l'unité de base de la durée de vie des batteries : 1 cycle-entier vaut un cycle de profondeur $\text{DoD} = 100\%$. A partir de la relation Eq.4.41, nous pouvons établir la valeur en nombre de "cycles-entiers" correspondant à une profondeur de décharge donnée.

$$P_{cy}(\text{DoD}) = \frac{C_F(1)}{C_F(\text{DoD})} = \text{DoD}^{2.37}$$

(4.42)

P_{cy} ("Poids des Cycle") évalue l'importance (la pondération) d'un cycle de profondeur quelconque par rapport à un cycle-entier (cycle de 100%). Par exemple, le poids d'un cycle de $\text{DoD} = 80\%$ est de $P_{cy} = 0.6$ cycle-entier, ce qui signifie qu'un cycle de 80% vaut 60% d'un cycle-entier (et non 80% d'un cycle-entier comme on pourrait penser). Le calcul du poids des cycles par intervalle de profondeurs de décharge est donné ci-dessous. Signalons que le calcul est fait pour le point milieu de chaque intervalle de profondeurs de décharge.

◆ Comptage des cycles

Tab. 4.1: Pondération des cycles selon leur profondeur de décharge

Classes i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Intervalles (DoD)	]1, 10]	]10, 20]	]20, 30]	]30, 40]	]40, 50]	]50, 60]	]60, 70]	]70, 80]	]80, 90]	]90, 100]
Poids P_{cyi}	0.001	0.011	0.037	0.083	0.150	0.242	0.359	0.505	0.680	0.885

L'exploitation du tableau de pondération ci-dessus nécessite la connaissance du profil de

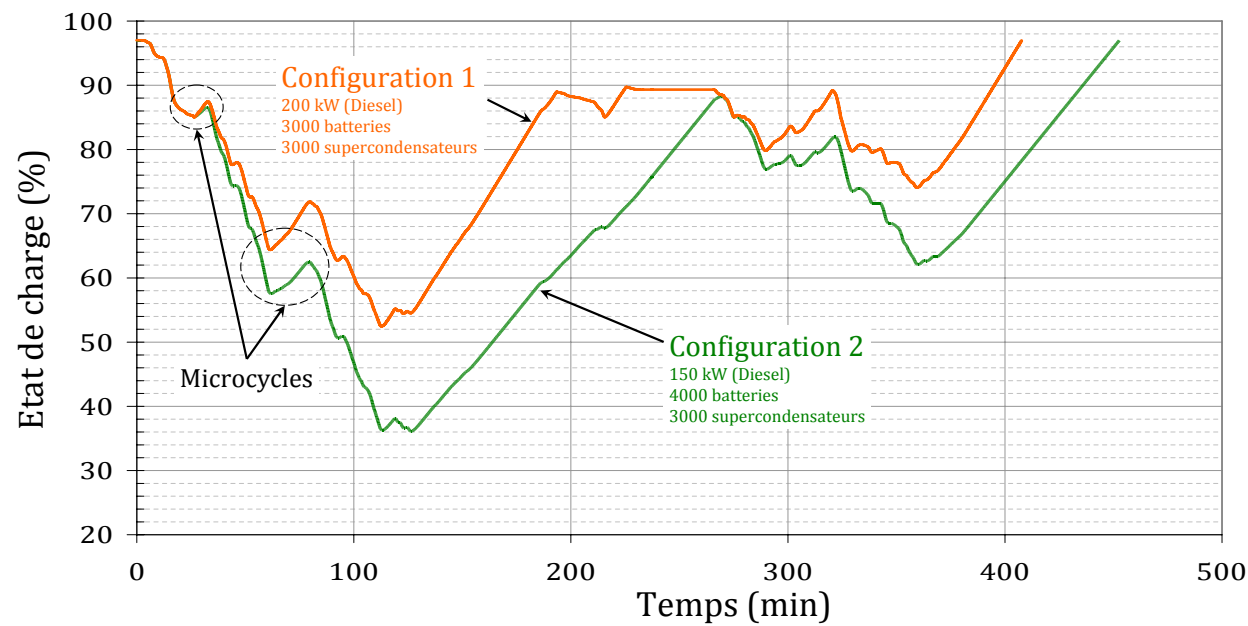


Fig. 4.19: Profils de l'état de charge des batteries pour deux configurations données

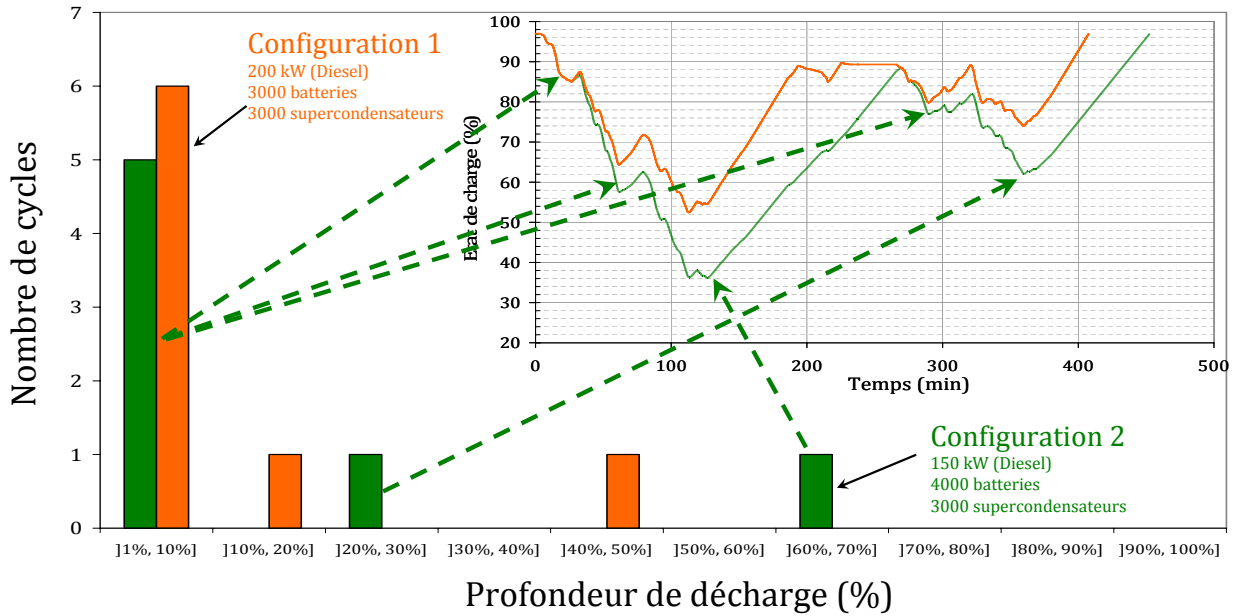


Fig. 4.20: Dénombrement des cycles selon leur profondeur de décharge

l'état de charge des batteries. La figure 4.19. montre, pour deux configurations choisies à titre d'exemples, les profils de l'état de charge des batteries, sur la mission dimensionnante m_{11} .

Mais les profils de l'état de charge ne sont pas directement exploitables. En effet, l'utilisation du graphe de prédiction de la durée vie des batteries (figure 4.18) suppose le dénombrement des cycles selon leur profondeur de décharge. Or, dans les profils de l'état de charge, les cycles sont "enchevêtrés" les uns dans les autres : comme le montre la figure 4.19, un cycle d'une certaine amplitude peut contenir des cycles de plus faible amplitude (microcycles). Le comptage des cycles est donc un problème informatique considérablement complexe : nous avons mis au point et éprouvé par des exemples concrets un algorithme qui résout ce problème. Afin d'éviter de nuire à la clarté de ce rapport, avec un problème informatique, nous avons choisi de traiter cet algorithme complexe en annexe (Annexe D). Retenons ici que cet algorithme fait le dénombrement des cycles selon leur profondeur de décharge d'après le principe suivant : *Par exemple, pour estimer le nombre de cycles dont la profondeur de décharge se situe entre 20% et 30%, nous commençons par filtrer le profil de profondeur de décharge en éliminant tous les cycles de moins de 20%, puis nous comptons sans discrimination tous les cycles restant quelle que soit leur profondeur de décharge, ce qui nous donne un nombre n_{20} de cycles. Ensuite, nous refiltrons le profil de profondeur de décharge en éliminant, cette fois, tous les cycles de moins de 30%, puis nous comptons à nouveau sans discrimination tous les cycles restant quelle que soit leur profondeur de décharge, ce qui nous donne un nombre n_{30} de cycles. La différence $n_{30} - n_{20}$ correspond au nombre de cycles recherché.*

A l'issue de ce processus, nous obtenons l'histogramme des cycles subis par les batteries. Reprenons les exemples de la figure 4.19 : la figure 4.20 montre pour ces deux configurations le dénombrement des cycles selon leur profondeur de décharge. Ces histogrammes résument le vécu des batteries pendant la mission concernée, compte tenu des configurations choisies.

◆ Indicateur de durée de vie

Nous disposons, d'une part, d'un tableau de pondération des cycles selon leur profondeur. D'autre part, nous avons élaboré un algorithme qui identifie selon leur profondeur, le nombre de cycles équivalent subis (N_{cy_i}) par chaque cellule de batterie sur une mission donnée. Le croisement de ces deux séries de données permet d'obtenir le tableau de statistiques ci-dessous.

Le nombre total de cycles-entiers subis par chaque cellule de batterie sur cette mission

Tab. 4.2: Pondération des cycles selon leur profondeur de décharge

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
(DoD)	]1, 10]	]10, 20]	]20, 30]	]30, 40]	]40, 50]	]50, 60]	]60, 70]	]70, 80]	]80, 90]	]90, 100]
P_{cy_i}	0.001	0.011	0.037	0.083	0.150	0.242	0.359	0.505	0.680	0.885
N_{cy_i} (config.1)	6	1	0	0	1	0	0	0	0	0
N_{cy_i} (config.2)	5	0	1	0	0	0	1	0	0	0

s'écrit alors :

$$nce_{cell} = \sum_{i=1}^{i=10} N_{cy_i} \cdot P_{cy_i} \quad (4.43)$$

Dans le cas de nos deux exemples de configuration, nous avons :

$$\begin{cases} nce_{cell}(\text{config.1}) &= 0.001 \times 6 + 0.011 \times 1 + 0.150 \times 1 = 0.167 \text{ cycle-entier} \\ nce_{cell}(\text{config.2}) &= 0.001 \times 5 + 0.037 \times 1 + 0.359 \times 1 = 0.401 \text{ cycle-entier} \end{cases} \quad (4.44)$$

Ce résultat paraît cohérent car, visiblement, les batteries de la configuration 2 sont plus sollicitées que celles de la configuration 1. Mais cette information n'est pas suffisante pour donner une indication de durée de vie, donc de coût-batterie⁽¹⁾. L'indicateur de durée de vie reflète l'ensemble des cycles-batteries consommés. En d'autres termes, si 100 batteries subissent 2 cycles-entiers chacune, alors le nombre total de cycles-batteries consommé est égal à 200. Plus encore, sur la base de ce principe, la situation où 100 batteries subissent chacune 2 cycles-entiers est vue comme équivalente à celle où 2 batteries subissent chacune

⁽¹⁾Nous estimons que la notion de durée de vie n'a de sens que si elle est rapportée à un coût. Par exemple, 1000 batteries ayant subi 5 cycles-entiers reviennent plus chères que 500 batteries ayant subi 9 cycles-entiers. En résumé, on pourrait considérer qu'un industriel achète des "cycles-batteries" plutôt que les batteries elles-mêmes.

100 cycles-entiers.

L'indicateur de durée de vie (ou du coût-batterie, ou le nombre total de cycles-batteries) s'écrit :

$$N_{cyb} = N_{BT} \times \left(\sum_{i=1}^{i=10} N_{cy_i} \cdot P_{cy_i} \right) \quad (4.45)$$

Dans le cas de nos deux exemples de configuration, nous avons :

$$\begin{cases} N_{cyb}(\text{config.1}) &= 0.167 \times 3000 = 501 \text{ cycles-batteries} \\ N_{cyb}(\text{config.2}) &= 0.401 \times 4000 = 1604 \text{ cycles-batteries} \end{cases} \quad (4.46)$$

La configuration 2 coûte donc plus cher en batteries que la configuration 1.

4.2.6 Conclusion

Dans cette section, nous avons présenté les cinq critères de faisabilité. L'évaluation de plusieurs de ces critères est basée sur des modèles analytiques approximatifs. Mais nous avons montré autant que possible la validité de ces modèles analytiques, avec des données réelles. Ces critères seront utilisés pour l'étude de faisabilité, dans la section suivante, puis dans le chapitre sur l'optimisation (chapitre 6).

4.3 Etude de faisabilité et choix du démonstrateur LHyDIE

L'étude de faisabilité est une étape essentielle de la conception, car elle seule permet de guider le choix des meilleures configurations. Nous désignons par Ω_{config} l'univers des configurations admissibles issues de la phase de synthèse. Rappelons qu'avec les paramètres d'entrée (200 fréquences F_{SC} et 24 groupes P_{GEN}), l'ensemble Ω_{config} contient 4800 (200×24) configurations. Deux des critères de faisabilité, à savoir le volume du système et la dégradation temporelle, seront posés en contraintes de faisabilité. Les autres : coût d'investissement, consommation de fuel et cyclage des batteries, seront confrontés les uns aux autres pour identifier les configurations donnant lieu aux meilleurs compromis.

4.3.1 Contrainte de volume et de dégradation temporelle

Comme nous l'avons souligné à la section 1.4.1 (Figure 1.10, page 25), le volume total disponible sur le démonstrateur LHyDIE est de 39 m^3 , dont 7 m^3 sont réservés pour accueillir les équipements traditionnels de la locomotive. Il s'agit notamment du compresseur, des bonbonnes d'air et du réservoir de fuel. Le système doit donc tenir dans un volume utile de 32 m^3 au maximum. La contrainte de volume s'écrit :

$$\begin{cases} (N_{SC}, N_{BT}, P_{GEN}) \in \Omega_{\text{config}} \\ \text{Volume}_{\Sigma}(N_{SC}, N_{BT}, P_{GEN}) \leq 32 \text{ m}^3 \end{cases} \quad (4.47)$$

La figure 4.21 montre l'évolution du volume du système en fonction de la puissance nominale du groupe Diesel et du nombre de supercondensateurs. Au vu de ces résultats, nous

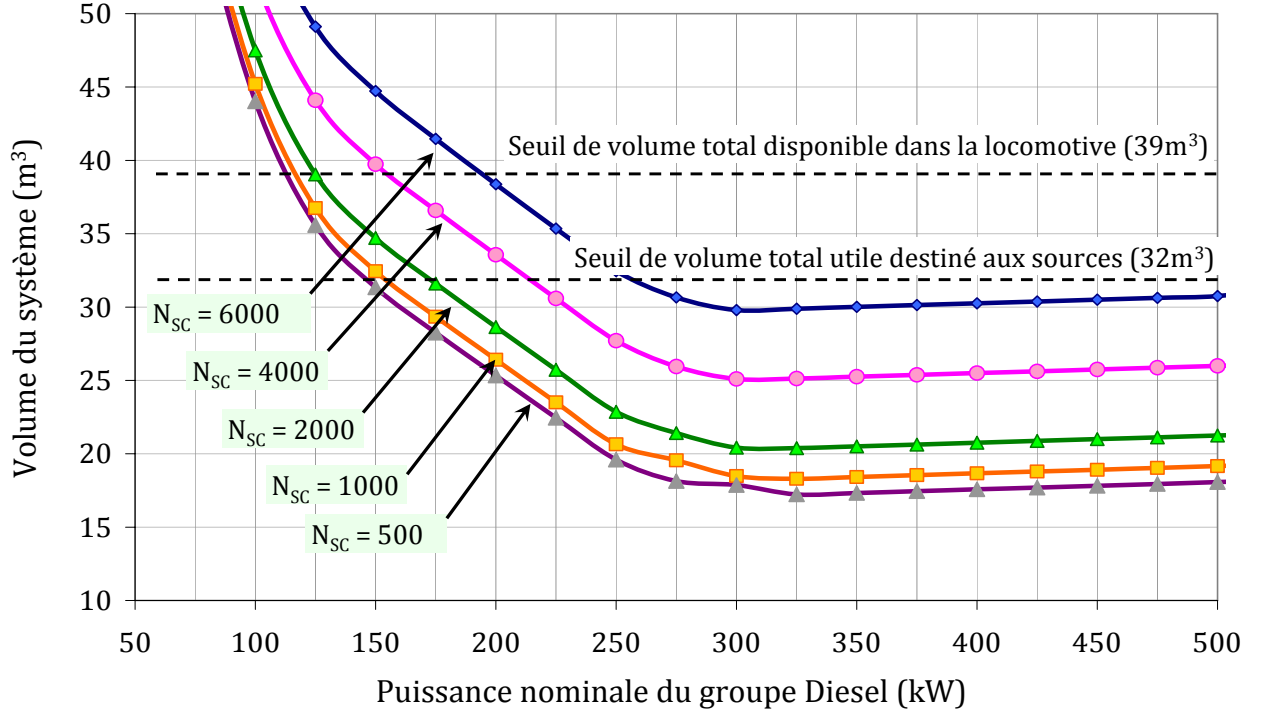


Fig. 4.21: Evolution de Volume_Σ en fonction de P_{GEN} et de N_{SC}

pouvons d'ores et déjà exclure les configurations dans lesquelles le groupe Diesel fait moins de 150 kW et celles comprenant plus de 6000 supercondensateurs car leur volume excède la limite tolérée.

Quant à la contrainte de dégradation temporelle, nous avons, en accord avec la SNCF, fixé le seuil de dégradation temporelle à 25%, soit un quart d'heure de recharge de batteries, à l'arrêt, au maximum, après une heure de mission difficile. Soulignons que ce seuil, apparemment élevé, est une limite fixée pour le pire des cas de mission dont l'occurrence est plutôt rare. Globalement, à moins de tomber sur une mission extrêmement difficile, la dégradation temporelle est assez faible. La contrainte de dégradation temporelle s'écrit :

$$\begin{cases} (N_{\text{SC}}, N_{\text{BT}}, P_{\text{GEN}}) \in \Omega_{\text{config}} \\ \text{Ind}_{\text{DT}}(N_{\text{SC}}, N_{\text{BT}}, P_{\text{GEN}}) \leq 0.25 \end{cases} \quad (4.48)$$

La figure 4.22 montre l'évolution de la dégradation temporelle en fonction de la puissance nominale du groupe Diesel et du nombre de supercondensateurs. La dégradation temporelle dépend essentiellement de la puissance nominale du groupe Diesel. Nous notons, tout d'abord, que la présence ou le nombre de supercondensateurs affecte très peu la dégradation temporelle. Plus important, nous notons que la dégradation temporelle est très "mauvaise" pour les petits groupes Diesel (275% pour $P_{\text{GEN}} = 50$ kW), puis décroît rapidement, pour s'annuler à partir de $P_{\text{GEN}} = 250$ kW. La contrainte de dégradation temporelle impose un groupe Diesel entre 150 kW et 600 kW.

La prise en compte des contraintes Eq.4.47 et Eq.4.48 nous a permis de réduire le nombre total de configurations éligibles de 4800 à 730. Nous obtenons ainsi un univers réduit Ω'_{config}

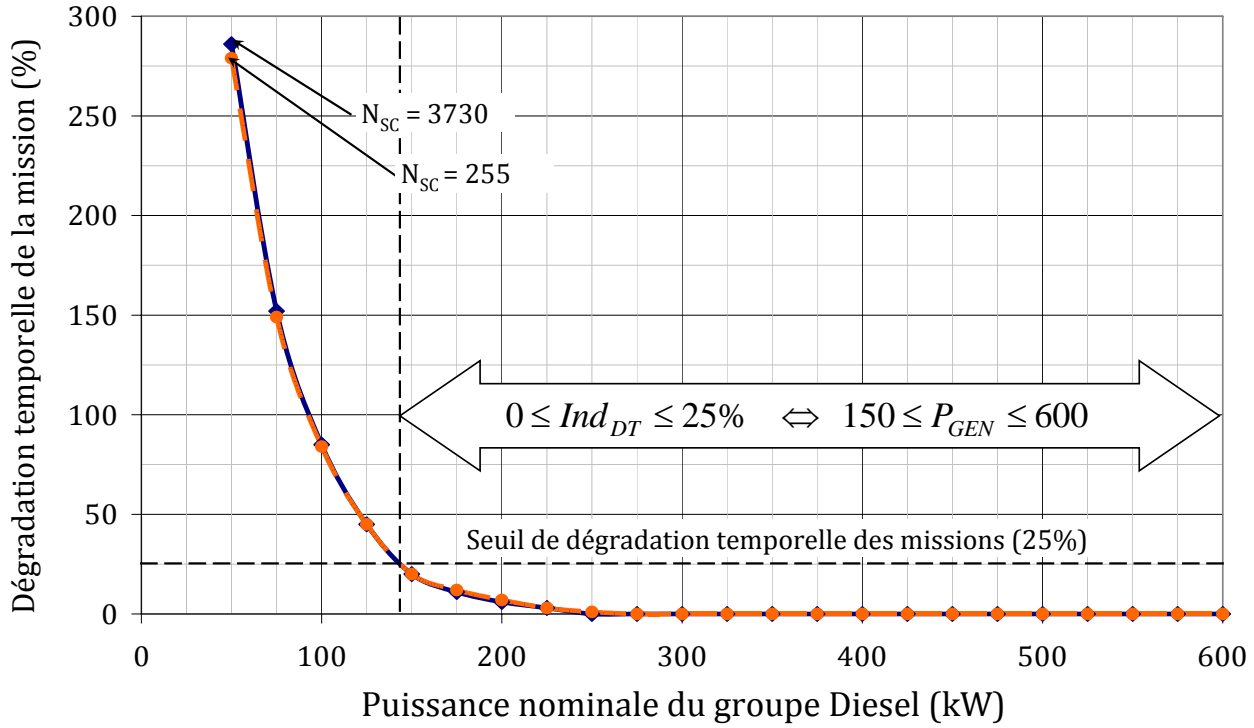


Fig. 4.22: Evolution de Ind_{DT} en fonction de P_{GEN} et de N_{SC}

de 730 configurations éligibles. Il reste à analyser l'univers Ω'_{config} à la lumière des critères de coût d'investissement, de cyclage des batteries et de consommation de fuel. Mais la recherche des meilleurs compromis avec trois critères simultanés n'est pas évidente. Nous allons donc commencer par une étude des facteurs d'influence des critères, afin de mieux appréhender les couplages entre les paramètres du système et les critères de faisabilité.

4.3.2 Etude des facteurs d'influence des critères de faisabilité

L'étude des facteurs d'influence des critères de faisabilité est basée sur le calcul des corrélations entre paramètres et critères de faisabilité. Il s'agit d'une étude qualitative, pour dégager des tendances fortes.

◆ Corrélations inter-paramétriques

Rappelons que le triplet de paramètres (P_{GEN} , N_{BT} , N_{SC}) présente une interdépendance forte, car le choix de deux de ces paramètres détermine, de façon unique, le troisième paramètre. Ce couplage fort entre les paramètres peut fausser les calculs de corrélation et masquer ou exagérer l'influence de certains paramètres sur les critères de faisabilité. Pour remédier à ce problème, nous allons choisir, pour l'étude des facteurs d'influence des critères de faisabilité, le couple de paramètres qui présente le plus faible couplage. Pour cela nous allons calculer les corrélations entre les paramètres. Soit n le cardinal de Ω'_{config}

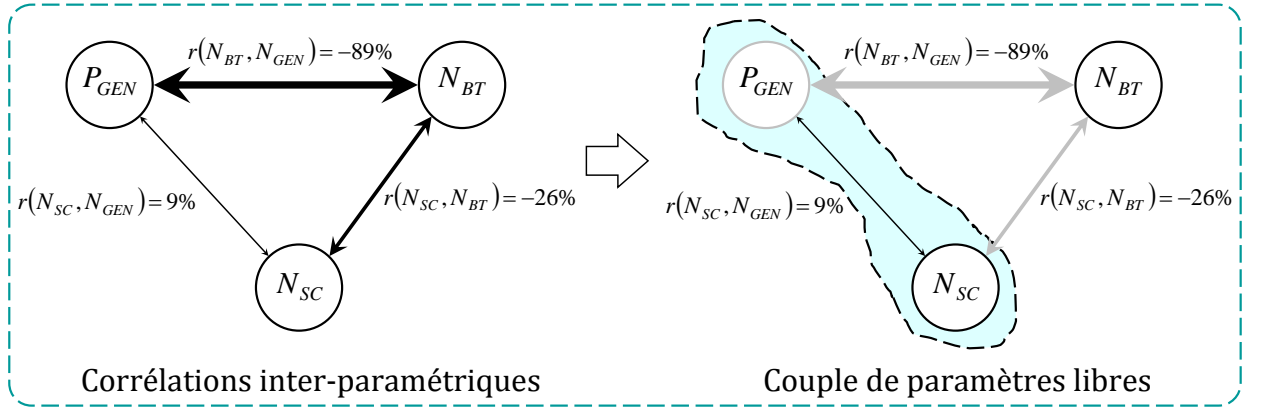


Fig. 4.23: Corrélations inter-paramétriques et couple de paramètres libres

et $P_{GEN_{i=1, \dots, n}}$, $N_{BT_{i=1, \dots, n}}$, $N_{SC_{i=1, \dots, n}}$ les tableaux de paramètres, la corrélation entre N_{SC} et N_{BT} s'écrit :

$$r(N_{SC}, N_{BT}) = \frac{\sum_{i=1}^n (N_{SC_i} - \overline{N_{SC}}) \cdot (N_{BT_i} - \overline{N_{BT}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (N_{SC_i} - \overline{N_{SC}})^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^n (N_{BT_i} - \overline{N_{BT}})^2}} \quad (4.49)$$

La corrélation entre N_{SC} et P_{GEN} s'écrit :

$$r(N_{SC}, P_{GEN}) = \frac{\sum_{i=1}^n (N_{SC_i} - \overline{N_{SC}}) \cdot (P_{GEN_i} - \overline{P_{GEN}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (N_{SC_i} - \overline{N_{SC}})^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_{GEN_i} - \overline{P_{GEN}})^2}} \quad (4.50)$$

Et la corrélation entre N_{BT} et P_{GEN} s'écrit :

$$r(N_{BT}, P_{GEN}) = \frac{\sum_{i=1}^n (N_{BT_i} - \overline{N_{BT}}) \cdot (P_{GEN_i} - \overline{P_{GEN}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (N_{BT_i} - \overline{N_{BT}})^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_{GEN_i} - \overline{P_{GEN}})^2}} \quad (4.51)$$

Les valeurs numériques obtenues sont :

$$\begin{cases} r(N_{SC}, N_{BT}) &= -26\% \\ r(N_{SC}, P_{GEN}) &= 9\% \\ r(N_{BT}, P_{GEN}) &= -89\% \end{cases} \quad (4.52)$$

Ces résultats confirment les observations que nous avons faites au chapitre 3.7 (page 98) concernant la faible influence des supercondensateurs sur le dimensionnement des autres sources. La hiérarchisation des corrélations inter-paramétriques, comme l'illustre la figure 4.23, nous conduit à la conclusion que le couple de paramètres présentant le moins de dépendance est le couple (P_{GEN}, N_{SC}) . C'est donc avec ces deux paramètres que nous allons

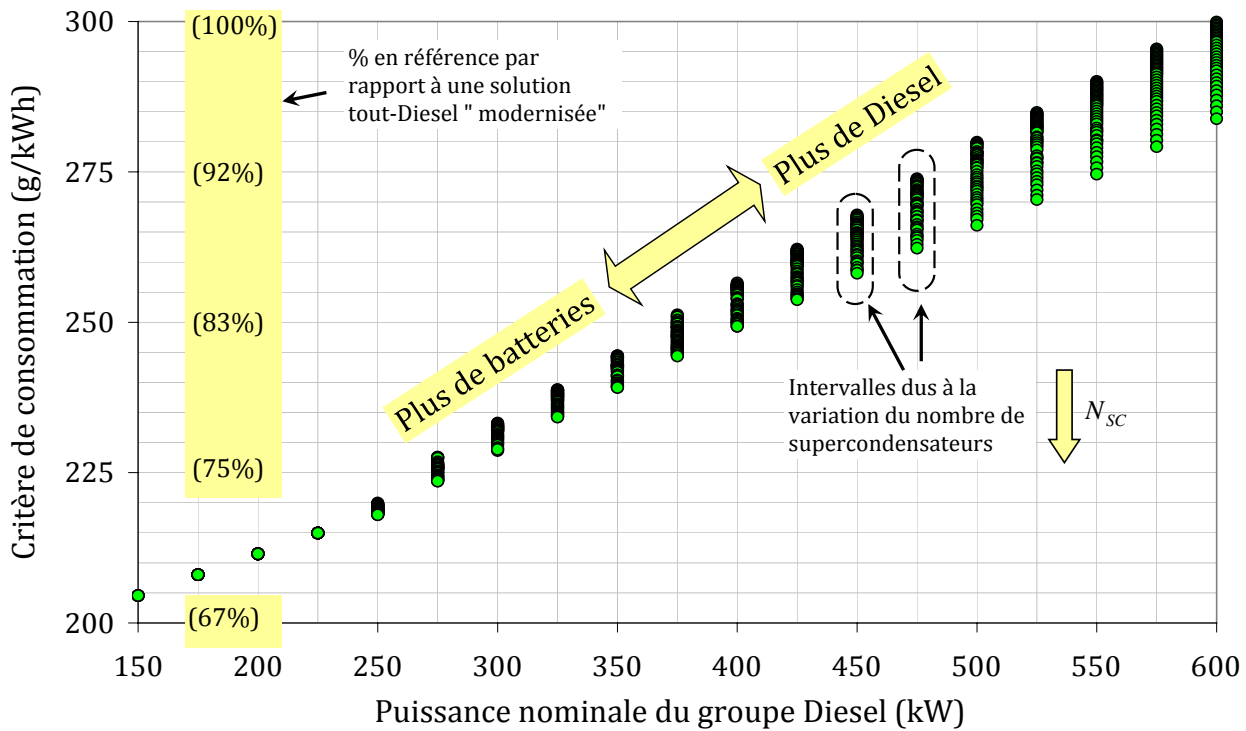


Fig. 4.24: Consommation de fuel en fonction du groupe Diesel

pouvoir étudier les dépendances entre paramètres et critères de faisabilité. Retenons par ailleurs que les variables P_{GEN} et N_{BT} étant fortement corrélées, elles peuvent se substituer l'une à l'autre en termes d'influence sur les critères.

◆ Facteurs d'influence de la consommation

La réduction de la consommation de fuel est un enjeu économique majeur, surtout dans le contexte actuel de crise pétrolière. Par ailleurs, comme la consommation de fuel est directement liée aux émissions de CO_2 , elle représente aussi un enjeu environnemental important. De fait, le critère de consommation présente un intérêt particulier dans le projet PLATHEE. Connaître les facteurs d'influence de ce critère favoriserait le choix de solutions, écologiquement et même économiquement, intéressantes.

Le calcul des corrélations entre les paramètres P_{GEN} , N_{SC} et l'indicateur de consommation de fuel donne :

$$\begin{cases} r(N_{SC}, Ind_{CF}) &= 17\% \\ r(P_{GEN}, Ind_{CF}) &= 99\% \end{cases} \quad (4.53)$$

Ces résultats sont sans appel : la taille du groupe Diesel (et donc le nombre de batteries embarquées) est le facteur d'influence décisif de la consommation de fuel et donc de la pollution en CO_2 . L'influence des supercondensateurs sur la consommation de fuel est négligeable. Nous retenons donc que, globalement, la réduction de la taille du groupe Diesel entraîne directement la réduction de la consommation de fuel, ce qui n'a rien d'étonnant du fait que l'ajout de batteries ne consomme pas de carburant (ou presque)... La figure 4.24 montre l'évolution de la consommation de fuel en fonction de la taille du groupe Diesel. Il apparaît que la consommation de fuel peut baisser jusqu'à 68%, pour un groupe

Diesel de 150 kW, par rapport à la locomotive Diesel de référence⁽¹⁾, soit une économie de 32% possible en gasoil et en émission de CO₂.

◆ Facteurs d'influence du coût d'investissement

Le critère de coût d'investissement, tel que nous l'avons défini à la section 4.2.3, est très partiel car il ne concerne que les dépenses initiales. Rigoureusement, le coût d'investissement devrait englober, sur un horizon de temps donné, le coût des composants (amortissement compris), le coût d'exploitation (fuel, maintenance, changement des batteries ou des supercondensateurs, ...). Néanmoins, le critère $Cout_{\Sigma}$ est un indicateur suffisamment pertinent pour cette phase de l'étude.

Le calcul des corrélations entre les paramètres P_{GEN} , N_{SC} et le coût d'investissement donne :

$$\begin{cases} r(N_{SC}, Cout_{\Sigma}) &= 88\% \\ r(P_{GEN}, Cout_{\Sigma}) &= -32\% \end{cases} \quad (4.54)$$

Ces résultats sont assez surprenants : d'une part, la taille du groupe Diesel, donc le nombre de batteries, a une d'influence relativement faible (pas nulle) sur le coût d'investissement et d'autre part, le nombre de supercondensateurs est un facteur d'influence prépondérant sur le coût d'investissement. Pour confirmer la faible influence du groupe Diesel (donc du nombre de batteries) sur le coût d'investissement, nous avons calculé la corrélation entre N_{BT} et $Cout_{\Sigma}$:

$$r(N_{BT}, Cout_{\Sigma}) = 23\% \quad (4.55)$$

Ce résultat s'explique par le fort couplage entre P_{GEN} et N_{BT} . En effet, l'augmentation du nombre de batteries entraîne un surcoût financier, en partie compensé, par la réduction de la taille du groupe Diesel qu'elle provoque par ailleurs. Ainsi, globalement, le coût d'investissement varie relativement faiblement en fonction de la puissance nominale du groupe Diesel. La prépondérance de l'influence du nombre de supercondensateurs sur le coût d'investissement s'explique par le fait qu'aucune des autres sources ne vient contre-balancer l'augmentation du nombre de supercondensateurs.

La figure 4.25 montre l'évolution du coût d'investissement en fonction du nombre de supercondensateurs. Globalement, le coût d'investissement croît avec le nombre de supercondensateurs. Notons par ailleurs que la réduction de la taille du groupe Diesel (l'augmentation du nombre de batteries) a tendance à aggraver le coût d'investissement.

◆ Facteurs d'influence du nombre total de cycles-batteries

Le nombre total de cycles-batteries⁽²⁾ étant directement proportionnel au nombre de batteries, il est évident que ce dernier est son premier facteur d'influence. Ce que nous essayons

⁽¹⁾La locomotive Diesel de référence n'est pas la BB63000 actuelle dont le moteur thermique est d'une génération antérieure aux moteurs actuels, mais plutôt une locomotive 100% Diesel équivalente qui serait équipée d'un groupe Diesel de nouvelle génération.

⁽²⁾Ce nombre doit toujours être associé à une durée de mission. Il s'agit ici des 12 heures de missions de triage et desserte locale du cahier des charges de LHyDIE.

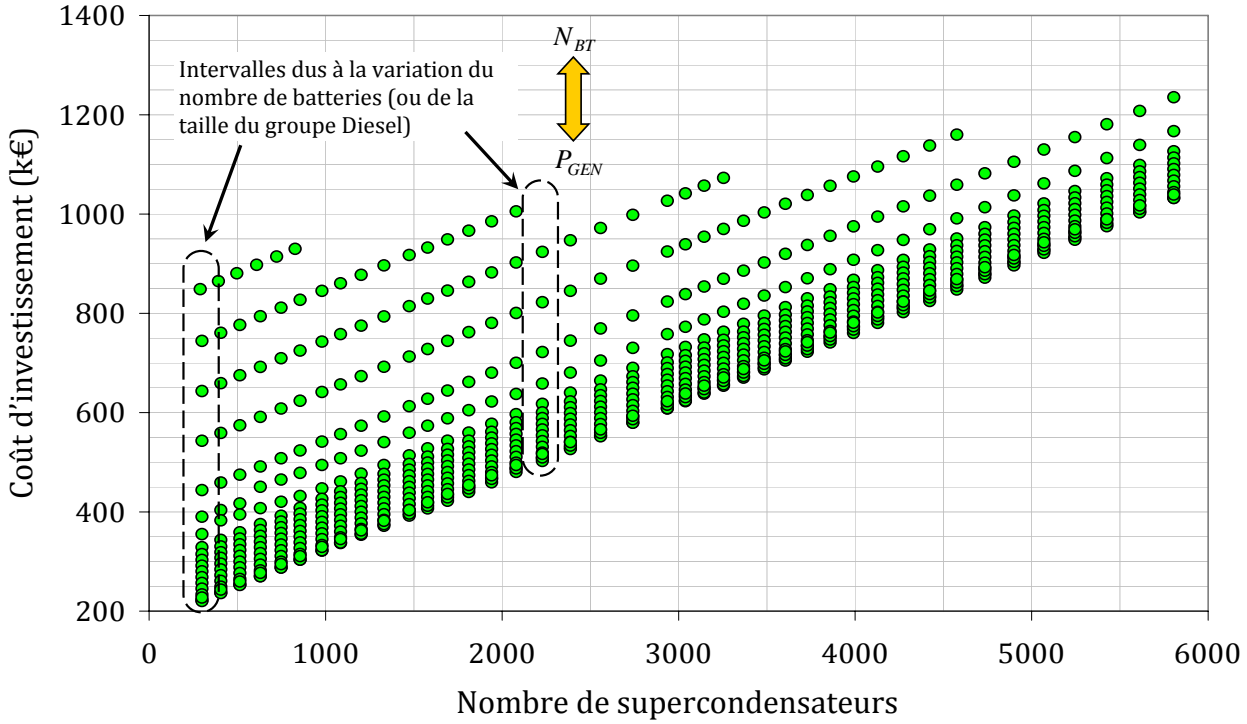


Fig. 4.25: Facteurs d'influence du coût d'investissement

de déterminer ici, c'est l'influence du nombre de supercondensateurs sur le nombre total de cycles-batteries. Le calcul des corrélations donne :

$$\begin{cases} r(N_{SC}, N_{cyb}) &= -27\% \\ r(P_{GEN}, N_{cyb}) &= -81\% \end{cases} \quad (4.56)$$

Comme on pouvait s'y attendre, la taille du groupe Diesel (ou le nombre de batteries) est le premier facteur d'influence du nombre total de cycles-batteries. Dans une mesure relativement plus faible, le nombre de supercondensateurs à une certaine influence sur le nombre total de cycles-batteries. La figure 4.26 montre l'évolution du nombre total de cycles-batteries en fonction de la taille du groupe Diesel : l'accumulation de points verticaux pour un même groupe Diesel correspond à l'influence des supercondensateurs qui varie par ailleurs. Notons que l'influence relative du nombre de supercondensateurs sur le nombre total de cycles-batteries, est d'autant plus significative que le nombre de batteries se réduit.

Nous attachons une importance particulière à l'influence des supercondensateurs sur le nombre total de cycles-batteries. En effet, sachant que l'augmentation du nombre de supercondensateurs fait "exploser" le coût d'investissement et que les supercondensateurs ont très peu d'influence sur la consommation, le seul critère qui pourrait justifier leur utilisation dans le cadre de ce projet⁽¹⁾ reste la durée de vie des batteries.

⁽¹⁾Rappelons que dans le cadre de ce projet, la locomotive hybride est destinée à des missions de desserte locale et de triage. S'il ne s'était agi que de triages, les influences des différents paramètres n'auraient pas été du même ordre. Il n'est donc pas question de rejeter définitivement l'utilisation des supercondensateurs dans l'hybridation ferroviaire.

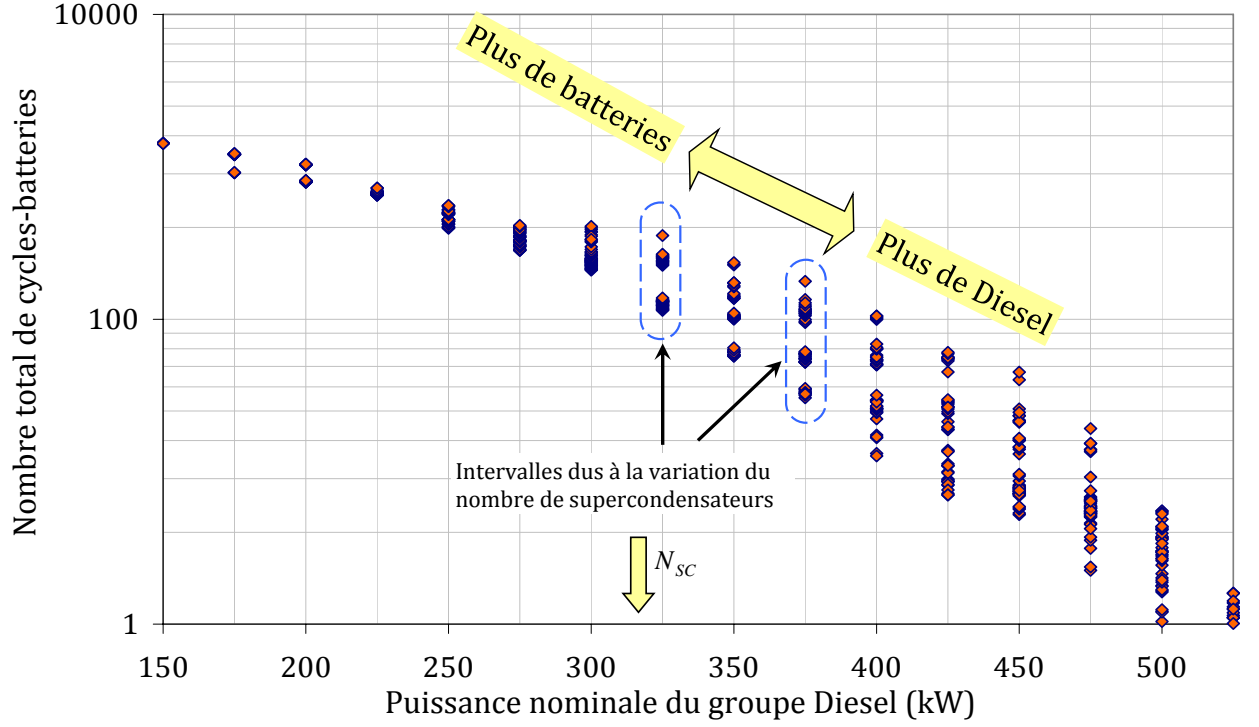


Fig. 4.26: Facteurs d'influence du nombre total de cycles-batteries

Soit χ_{sc} le nombre de supercondensateurs qu'il faut pour améliorer (réduire) de 1% le nombre total de cycles-batteries (ou le coût des batteries). Le calcul de χ_{sc} est assez complexe.

Pour un groupe P_{GEN} donné, nous déterminons les variations maximales $\Delta N_{SC}(P_{GEN})$ et $\Delta N_{cyb}(P_{GEN})$.

$$\begin{cases} \Omega_{p_{gen}}(P_{GEN}) &= \{ (N_{SC_i}, N_{BT_i}, P_{GEN}) \in \Omega'_{config} \} \\ \Delta N_{SC}(P_{GEN}) &= \max_{\Omega_{p_{gen}}} (N_{SC_i}) - \min_{\Omega_{p_{gen}}} (N_{SC_i}) \\ \Delta N_{cyb}(P_{GEN}) &= \max_{\Omega_{p_{gen}}} (N_{cyb_i}) - \min_{\Omega_{p_{gen}}} (N_{cyb_i}) \end{cases} \quad (4.57)$$

$\Omega_{p_{gen}}(P_{GEN})$ représentant l'ensemble des configurations ayant le groupe P_{GEN} . Ainsi, une amélioration $\Delta N_{cyb}(P_{GEN})$ du coût-batterie (ou cycle-batterie) est obtenue pour une variation $\Delta N_{SC}(P_{GEN})$ du nombre de supercondensateurs et ceci pour un groupe P_{GEN} . χ_{sc} s'écrit alors :

$$\chi_{sc}(P_{GEN}) = \frac{0.01 \times \Delta N_{SC}(P_{GEN})}{\Delta N_{cyb}(P_{GEN})} \quad (4.58)$$

χ_{sc} est défini en fonction de P_{GEN} , mais, avec le fort couplage entre P_{GEN} et N_{BT} , il est possible de l'étudier en fonction de N_{BT} . La figure 4.27 montre l'évolution du nombre de supercondensateurs nécessaires pour améliorer de 1% la durée de vie des batteries en fonction du nombre de batteries. Il apparaît que χ_{sc} évolue de façon exponentielle en fonction de N_{BT} . Plus concrètement, plus il y a de batteries (donc moins il y a de Diesel), plus faible est l'impact (positif) des supercondensateurs sur la durée de vie des batteries. Par

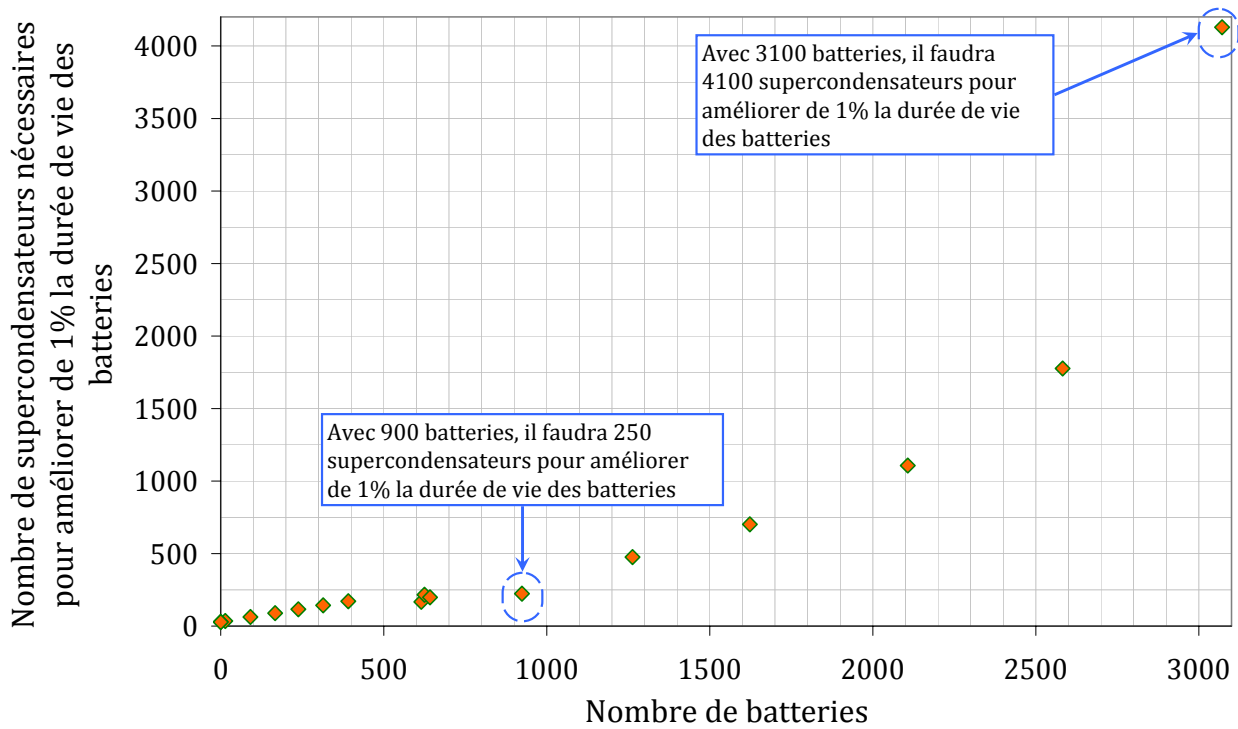


Fig. 4.27: Influence des supercondensateurs sur la durée de vie des batteries

exemple, pour une configuration avec 900 batteries, il faut 250 supercondensateurs pour améliorer de 1% la durée de vie des batteries. Dès que le nombre de batteries passe à 3100, χ_{sc} passe à 4100 éléments.

Finalement, pour une locomotive hybride destinée à un segment de dessertes locales et de triages, les supercondensateurs, à travers l'absorption des microcycles, ont un impact positif sur la durée de vie des batteries. Mais cet impact reste relativement faible tandis que le surcoût système engendré est conséquent. Cette analyse ne tient pas compte des aspects liés à la dynamique des courants. En effet, le filtrage des missions épargne aux batteries les courants de fortes dynamiques. Il est admis que ce filtrage de la mission des batteries pourrait prolonger leur durée de vie, mais cette hypothèse n'est pas établie de façon expérimentale [45].

4.3.3 Configurations optimales au sens de Pareto

Dans cette sous-section, nous présentons les meilleures configurations selon nos trois critères de faisabilité. Pour cela, nous n'allons conserver que les configurations non dominées,

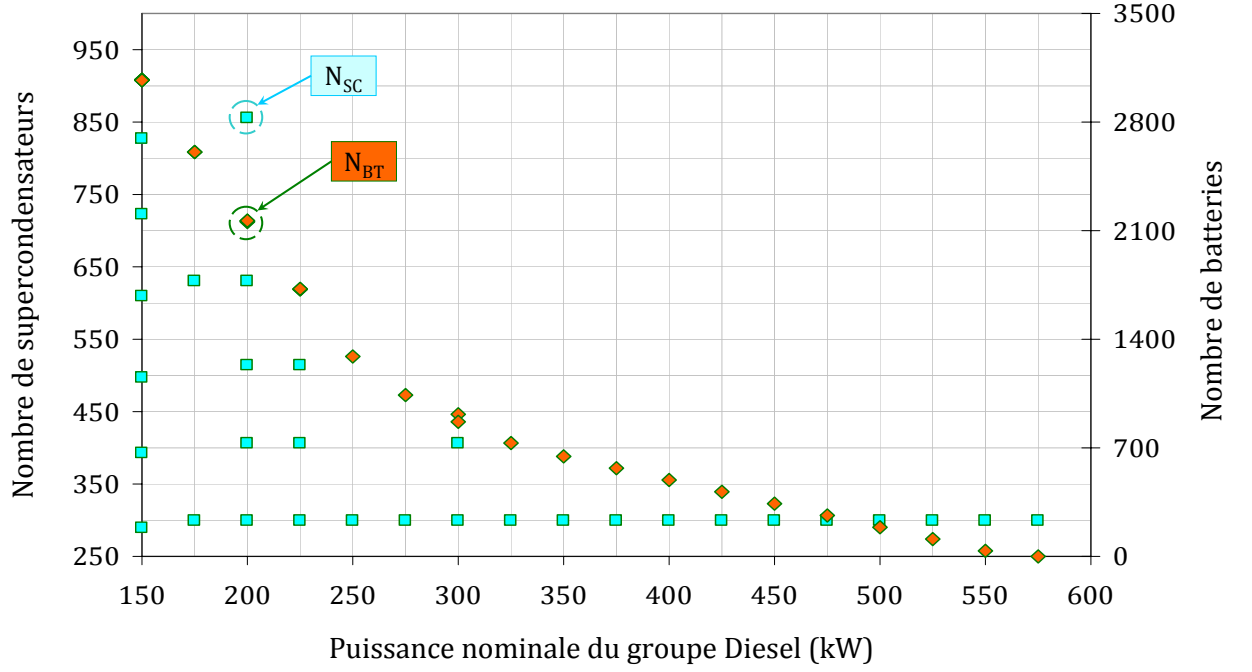


Fig. 4.28: Représentation des configurations optimales au sens de Pareto

au sens de Pareto⁽¹⁾ [47, 48]. Plus concrètement, soit Ω_{pareto} l'ensemble des configurations non-dominées, Ω_{pareto} se définit mathématiquement de la façon suivante :

$$\Omega_{\text{pareto}} = \Omega'_{\text{config}} - \left\{ \text{cfg}_i \in \Omega'_{\text{config}} \text{ tels que } \exists \text{cfg}_j \in \Omega'_{\text{config}} \text{ et} \right. \\ \left. (\text{Ncyb}(\text{cfg}_j) < \text{Ncyb}(\text{cfg}_i)) \vee (\text{Cout}_{\Sigma}(\text{cfg}_j) < \text{Cout}_{\Sigma}(\text{cfg}_i)) \right. \\ \left. \vee (\text{Ind}_{\text{CF}}(\text{cfg}_j) < \text{Ind}_{\text{CF}}(\text{cfg}_i)) \right\} \quad (4.59)$$

Ω_{pareto} contient une trentaine de configurations qui constituent les meilleurs compromis possibles. La figure 4.28 montre, dans l'espace paramétrique, les configurations de l'ensemble Ω_{pareto} . Alors que le nombre de batteries évolue entre 0 et 3300 éléments, le nombre de supercondensateurs ne dépasse pas 930 éléments. Cela confirme que, avec le critère de durée de vie des batteries tel que nous l'avons défini⁽²⁾ et avec l'association dans le cahier des charges des dessertes locales et des triages, les supercondensateurs ont un intérêt relativement faible pour la locomotive hybride.

Maintenant, nous allons représenter l'ensemble Ω_{pareto} dans l'espace des critères de faisabilité. La figure 4.29 montre l'évolution, pour les configurations de Ω_{pareto} , de la consommation de fuel en fonction du coût d'investissement. Notons qu'il y a antagonisme entre ces deux critères : la réduction de la consommation de fuel provoque l'explosion du coût d'investissement. Concernant les paramètres, l'augmentation du nombre de batteries, même si elle est suivie d'une réduction de la taille du groupe Diesel et donc d'un gain financier

⁽¹⁾Il s'agit des configurations qu'il n'est pas possible d'améliorer suivant les trois critères de faisabilité, de façon simultanée.

⁽²⁾Sans prendre en compte les aspects liés à la dynamique des courants.

sur ce dernier, entraîne quand même l'augmentation du coût d'investissement⁽¹⁾ car les batteries coûtent spécifiquement plus cher que le groupe Diesel. Sur le graphe de la figure 4.29, nous distinguons trois zones :

- Une zone (R) où l'amélioration de la consommation se fait à moindre coût mais où la consommation reste globalement élevée : ce qui justifie l'appellation de "zone rouge".
- Une zone (V) à l'opposé de la zone (R) où l'amélioration de la consommation coûte extrêmement cher. Cette zone présente une consommation globale très faible : ce qui justifie l'appellation de "zone verte".
- Une zone (B) se situe entre les deux zones précédentes. Cette zone fait le compromis entre le coût d'investissement et la consommation de fuel : nous parlons de "zone bleue".

Notons que cette analyse reste assez partielle, même si elle nous permet dans cette phase d'évaluer les différentes configurations et de faire le choix du prototype LHyDIE. En effet, il y a couplage entre le critère de consommation et celui du coût système. Par exemple, les configurations de la zone rouge peuvent s'avérer économiquement moins intéressantes qu'il n'y paraît, le coût d'exploitation, à cause de la forte consommation de fuel, venant atténuer le gain financier initial. De la même façon, les solutions vertes, apparemment très chères peuvent, grâce aux gains de fuel, s'avérer plus intéressantes à l'exploitation. Au chapitre 6 sur l'optimisation, nous reviendrons sur ces aspects ; nous présenterons notamment une association plus efficace des critères de faisabilité.

La figure 4.30 montre l'évolution, pour les configurations optimales, de la consommation de fuel en fonction du nombre total de cycles-batteries. A l'instar de l'antagonisme consommation – coût d'investissement, l'économie de fuel se paye par un nombre de cycles-batteries plus élevé. Cette observation renvoie également à l'antagonisme fondamental entre critère écologique et critère économique⁽²⁾. Nous présentons à la figure 4.31 une confrontation entre coût d'investissement et nombre total de cycles-batteries. Comme on pouvait s'y attendre ces deux critères varient dans le même sens. Normal, puisque le nombre total de cycles-batteries a une incidence directe sur le coût d'investissement.

Globalement, pour la locomotive hybride destinée aux missions de triage et de desserte locale du cahier des charges de ce projet, les configurations optimales comprennent un nombre très faible de supercondensateurs. La réduction de la consommation de fuel est contre-balancée par l'augmentation simultanée du coût d'investissement et du nombre de cycles-batteries. Les meilleurs compromis entre coût d'investissement et nombre de cycles-batteries d'une part, et consommation de fuel d'autre part, dépendent du dosage entre la quantité de batteries et la taille du groupe Diesel. Le choix de la configuration est basée en partie sur cette analyse.

⁽¹⁾Cette conclusion semble contredire l'étude des facteurs d'influence où nous avons noté la prépondérance de l'influence du nombre de supercondensateurs et la faible influence du nombre de batteries (Eq.4.55, page 133), sur le coût système. Signalons que cette étude est faite sur l'ensemble global Ω'_{config} des configurations éligibles et qu'en réduisant cet ensemble à Ω_{pareto} des configurations optimales au sens de Pareto, nous provoquons une modification des influences.

⁽²⁾Consommer moins (ou polluer moins) demande un investissement initial colossal.

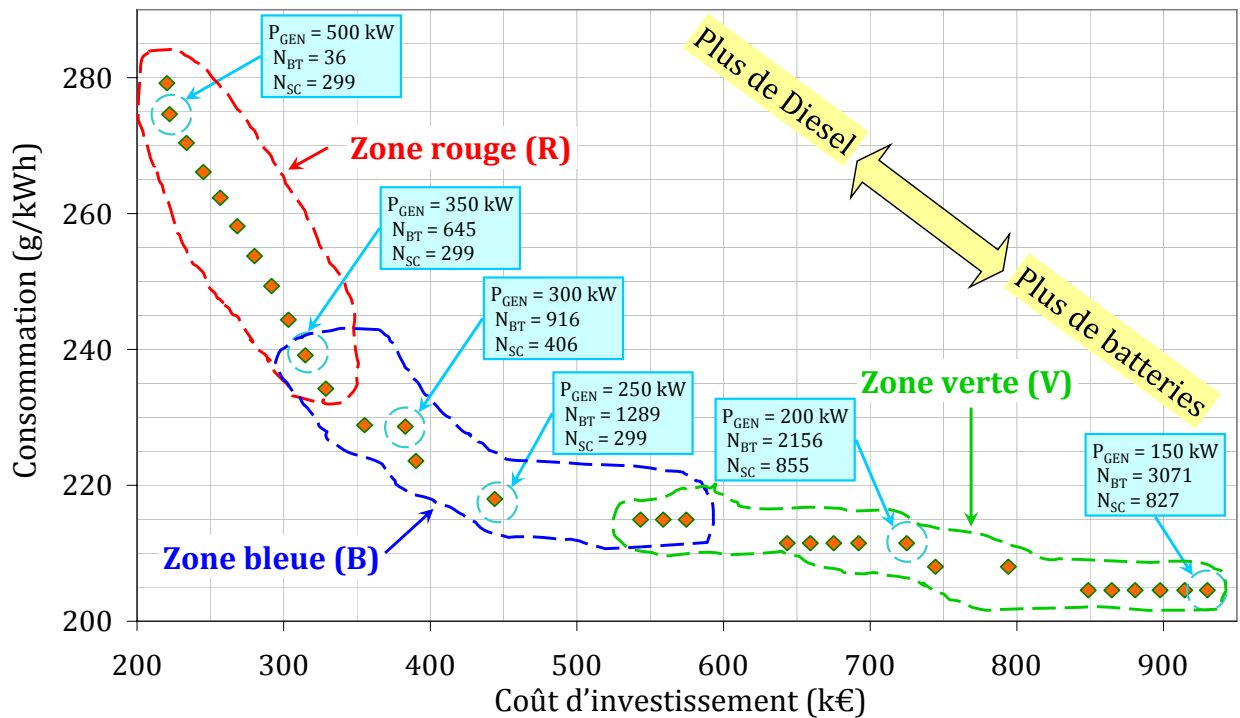


Fig. 4.29: Consommation de fuel et coût d'investissement

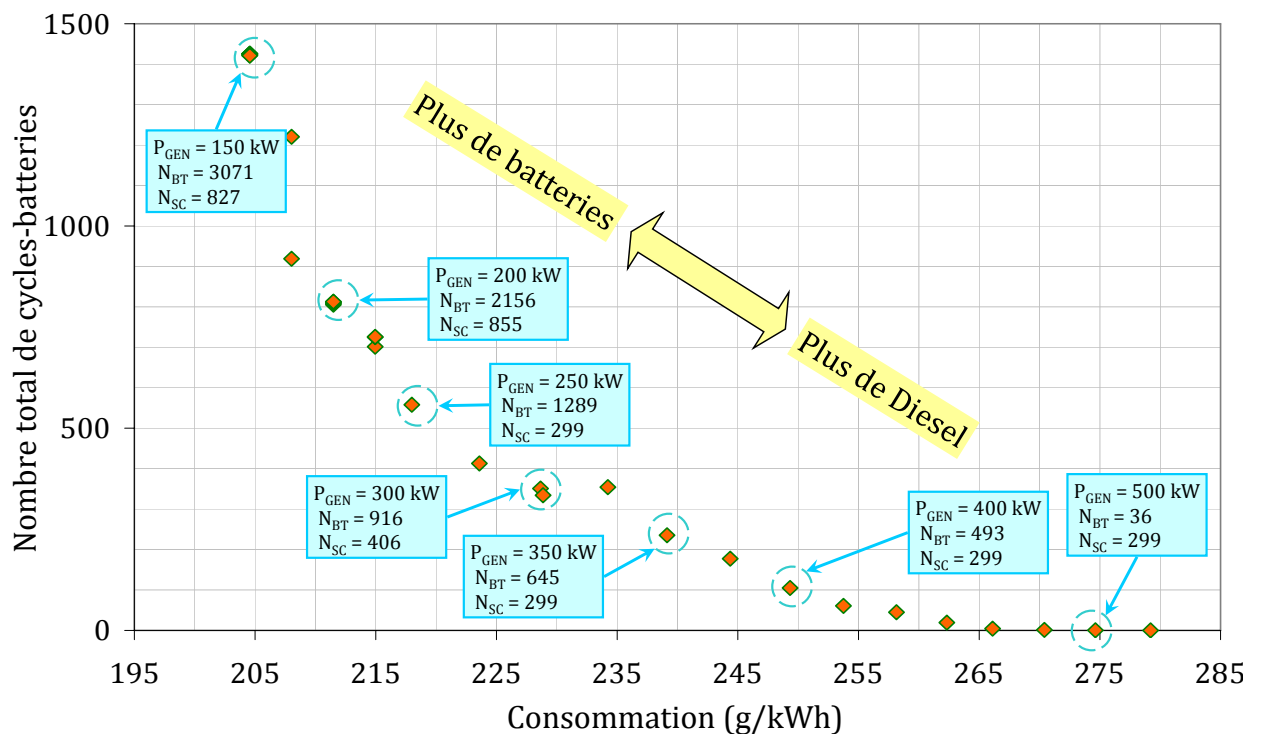


Fig. 4.30: Consommation de fuel et nombre de cycles-batteries

4.3.4 Choix du démonstrateur LHYDIE

La SNCF ambitionne de pouvoir réaliser une réduction de la consommation de fuel et des émissions de CO_2 d'au moins 30%, ce qui situe le groupe Diesel entre 150 kW et

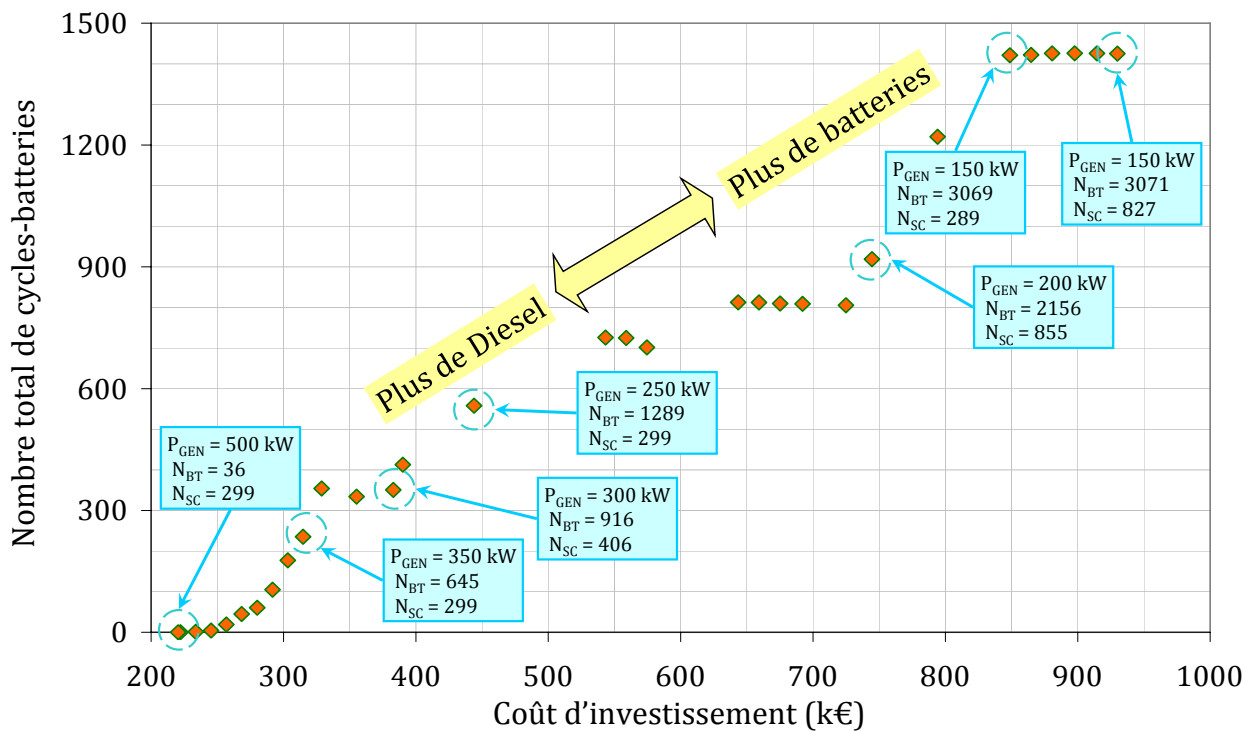


Fig. 4.31: Coût système et nombre de cycles-batteries

250 kW d'après la figure 4.24 (page 132). Nous avons donc proposé, parmi les configurations optimales, un jeu de 5 configurations que nous montrons dans le tableau 4.3.

Tab. 4.3: Jeu de configurations proposées pour le démonstrateur LHyDIE

Caractéristiques		Configurations				
		Cfg ₁	Cfg ₂	Cfg ₃	Cfg ₄	Cfg ₅
Puissance Diesel : P_{GEN}	(kW)	150	175	200	225	250
Nombre de batteries : N_{BT}		3071	2607	2156	1721	1289
Nombre de supercondensateurs : N_{SC}		827	630	856	514	299
Volume du système : $Volume_{\Sigma}$	(m ³)	32	28	26	22	19
Coût d'investissement : $Cout_{\Sigma}$	(k€)	930	794	725	575	444
Nombre total de cycles-batteries : N_{cyb}		1425	1220	805	702	558
Consommation de fuel : Ind_{CF}	(g/kWh)	205	208	211	215	218

Après étude de ce tableau, la SNCF a choisi la configuration Cfg₄ comme configuration de base : un groupe Diesel de 225 kW, 1721 batteries et 514 supercondensateurs. Avec cette configuration, le coût d'investissement est de 575 k€ et la consommation de fuel est globalement de 205 g/kWh.

La SNCF a révisé cette configuration à la baisse en acceptant une légère dégradation (au

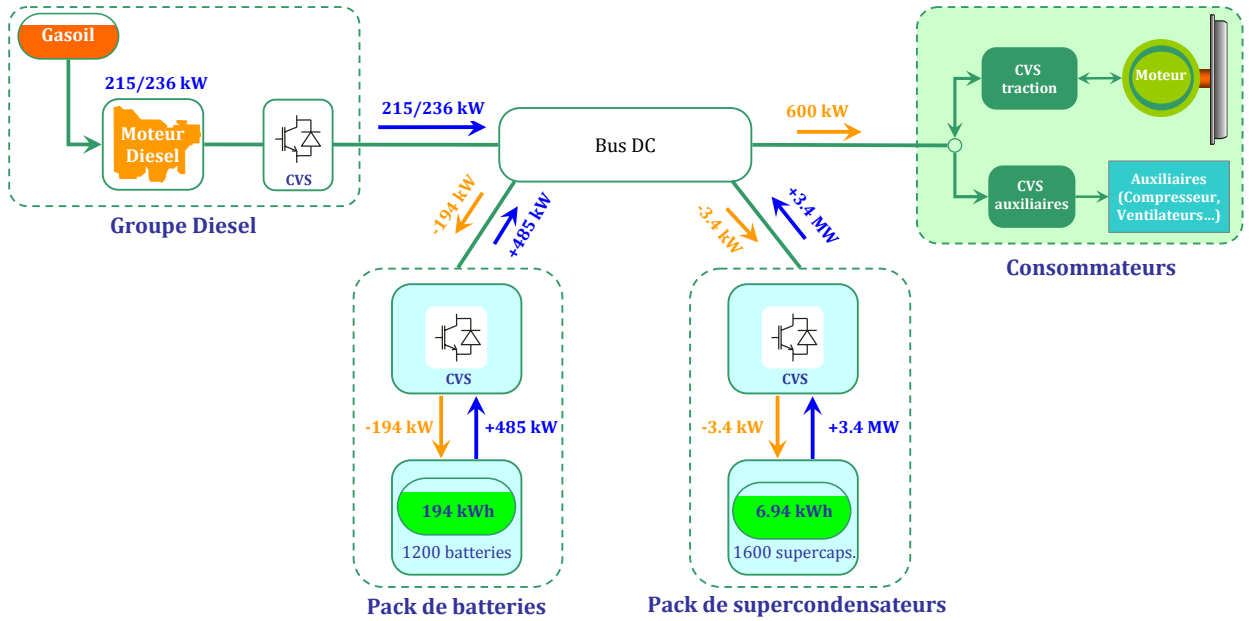


Fig. 4.32: Configuration retenue pour LHyDIE

sens énergétique) de la mission dimensionnante m_{11} . Le nombre de batteries fut alors fixé à 1200 éléments. Par ailleurs, la SNCF, voulant expérimenter l'impact des supercondensateurs sur la durée de vie des batteries, a choisi d'embarquer 1600 supercondensateurs au lieu des 514 de la configuration de base. La figure 4.32 montre la configuration énergétique choisie et les flux maximums de puissance disponibles. LHyDIE embarque 194 kWh de batteries pouvant admettre -194 kW en charge et 485 kW en décharge. Le pack de supercondensateurs compte 6.94 kWh de capacité de stockage totale et 3.4 MW de puissance limite. Le groupe Diesel standard le plus proche de la solution choisie est un CURSOR 8 de 2HEnergy de 215 kW nominal (236 kW maximum).

Avec cette nouvelle configuration, nous avons relancé l'ensemble des processus d'évaluation des critères de faisabilité. Nous obtenons pour les 12 heures de mission du cahier des charges, les résultats suivants :

$$\begin{cases} P_{\text{GEN}} = 215 \\ N_{\text{BT}} = 1200 \\ N_{\text{SC}} = 1600 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \text{Cout}_{\Sigma} = 607 \text{ k€} \\ \text{Ind}_{\text{CF}} = 213.6 \text{ g/kW} \\ \text{Ncyb} = 711 \text{ cycles-batteries} \end{cases} \quad (4.60)$$

La figure 4.33 situe la configuration du démonstrateur LHyDIE dans l'espace des critères de faisabilité. Notons que ce choix est assez optimisé sur le plan de la consommation de fuel, du coût d'investissement et du nombre total de cycles-batteries. Pour les 12 heures de missions du cahier des charges, le nombre total de cycles-batteries vaut 711. En raisonnant sur la base de 8 heures de mission par jour (soit $8 \times 360 \text{ h/an}$), sachant que le NiCd offre

environ 900 cycles (à 100%) (nombre théorique) par cellule, la durée de vie des 1200 batteries peut être estimée à :

$$\text{Durée de vie} = \frac{900 (\text{cycles/batterie}) \times 1200 \text{ batteries} \times 12}{8 \times 360 (\text{heures/an}) \times 711 \text{ cycles}} \quad (4.61)$$

$$\text{Durée de vie} = 6.3 \text{ ans} \quad (4.62)$$

Il s'agit là d'une estimation assez approximative de la durée de vie des batteries. Nous reviendrons sur cette technique de calcul au chapitre 6. Signalons qu'au vu des missions du pack de batteries, Hoppecke a garanti une durée de vie de 5 ans. Notre estimation ne semble pas "farfelue".

Maintenant que la configuration du démonstrateur est décidée, il convient d'analyser le comportement de cette locomotive particulière sur quelques missions typiques du cahier des charges. Dans la sous-section qui suit, nous allons simuler la locomotive LHyDIE sur une mission de triage puis sur une mission de desserte locale, afin d'étudier le comportement de la locomotive selon la nature de la mission réalisée.

4.3.5 Comportement de LHyDIE selon la mission réalisée

Cette sous-section vient en complément de l'étude comportementale initiée à la sous-section 4.1.5 où nous avons mis en évidence quelques aspects du fonctionnement de la locomotive hybride. Dans cette sous-section, l'étude est plus précise car nous ne considérons désormais que la configuration choisie pour le démonstrateur LHyDIE.

♦ LHyDIE sur la mission de triage m_1

La figure 4.34 montre l'évolution de la locomotive LHyDIE sur une mission de triage. Sur cette mission le rôle des supercondensateurs a été prépondérant : les batteries ont été déchargées d'à peine 5%, le groupe Diesel est resté éteint la moitié du temps, les supercondensateurs ont absorbé presque la totalité de la mission fluctuante.

♦ LHyDIE sur la mission de desserte locale m_{11}

La figure 4.35 montre l'évolution de la locomotive LHyDIE sur une mission de desserte. Contrairement au cas de triage, la desserte sollicite énormément les batteries. L'état de charge des batteries est descendu jusqu'au seuil de 30%. De plus, sur certaines phases de la mission, le groupe est monté à sa puissance maximale de 236 kW. Quant aux supercondensateurs, ils ont subi un grand nombre de cycles qui sont autant de microcycles épargnés aux batteries.

4.3.6 Conclusion

Dans cette section, nous avons fait une étude de faisabilité complète, sur la base de deux contraintes (volume et dégradation temporelle) et trois critères de faisabilité (consommation, coût d'investissement et durée de vie des batteries). Cette étude nous a permis de

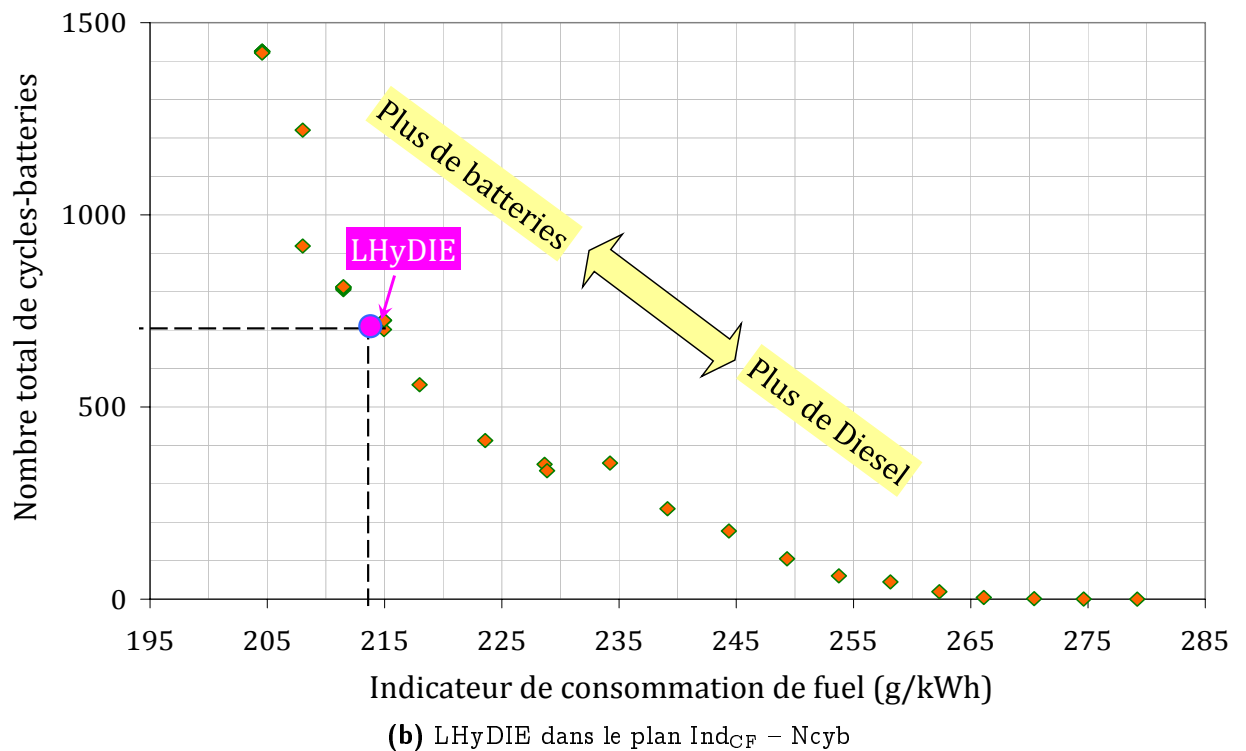
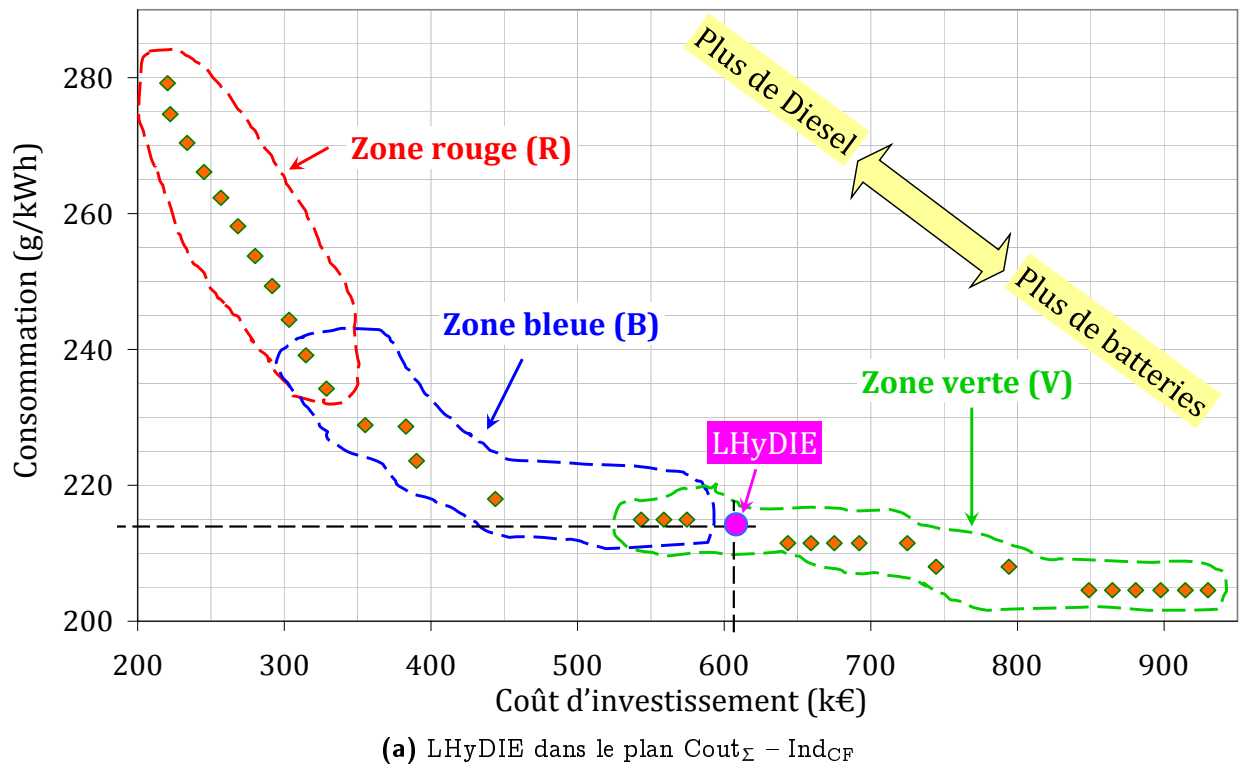


Fig. 4.33: Situation de la configuration du démonstrateur dans l'espace des critères

repérer les configurations de locomotives hybrides les plus intéressantes, vis-à-vis du cahier des charges de ce projet. Nous avons notamment montré que l'association, dans le cahier des charges, des missions de triage et de desserte locale n'est pas favorable aux configurations à grand nombre de supercondensateurs. A l'issue de cette étude, le choix de

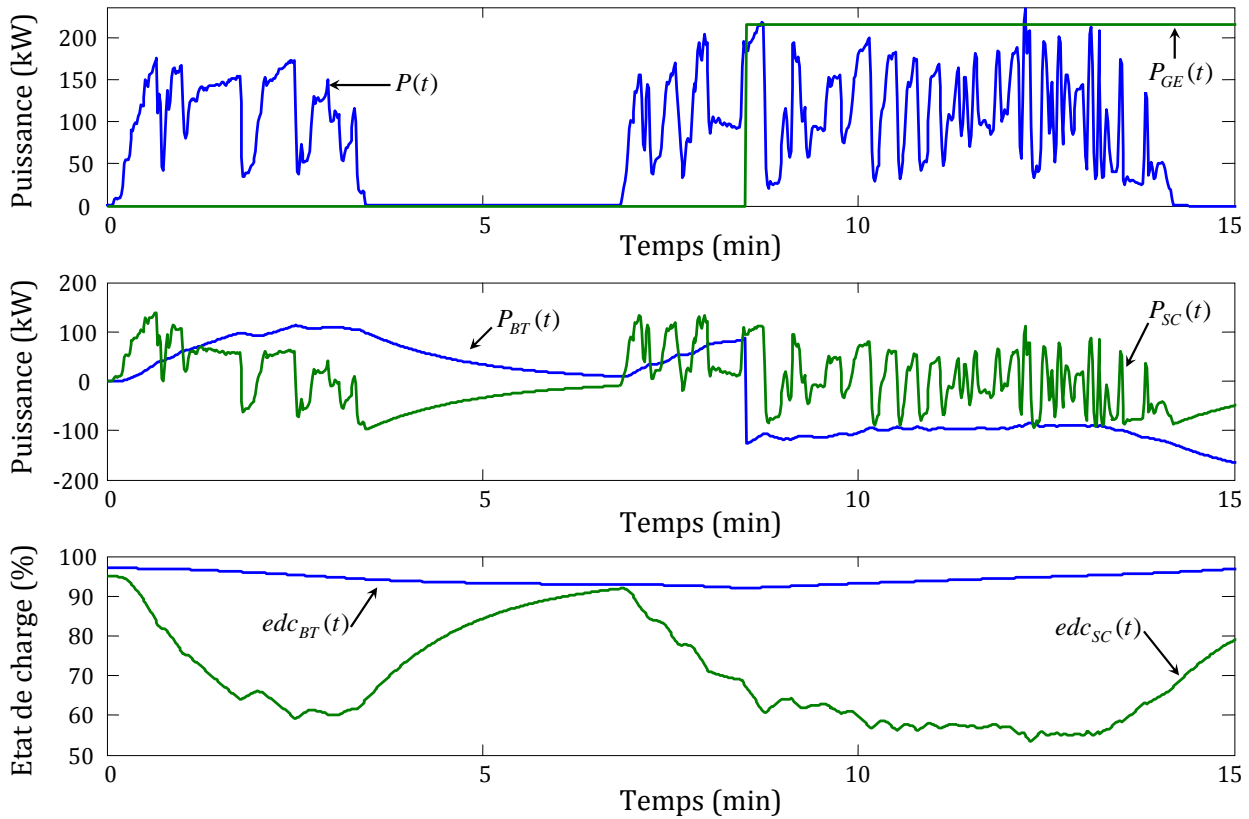


Fig. 4.34: LHyDIE sur la mission de triage m_1

configuration du démonstrateur fut décidé. La simulation de cette configuration sur une mission de triage montre une participation assez prépondérante des supercondensateurs qui ont permis une économie de cycles-batteries. Mais sur une desserte locale, malgré une forte absorption des microcycles par les supercondensateurs, les batteries ont été vidées en dessous de 60% de leur capacité de stockage. Ces deux exemples distincts montrent l'importance de la mission par rapport au dimensionnement système.

Après le dimensionnement énergétique, il reste le dimensionnement électrique, c'est-à-dire le calcul de la disposition série/parallèle des éléments de stockage, le choix de la tension de bus et le dimensionnement des convertisseurs. La section qui suit aborde le dimensionnement électrique du démonstrateur LHyDIE.

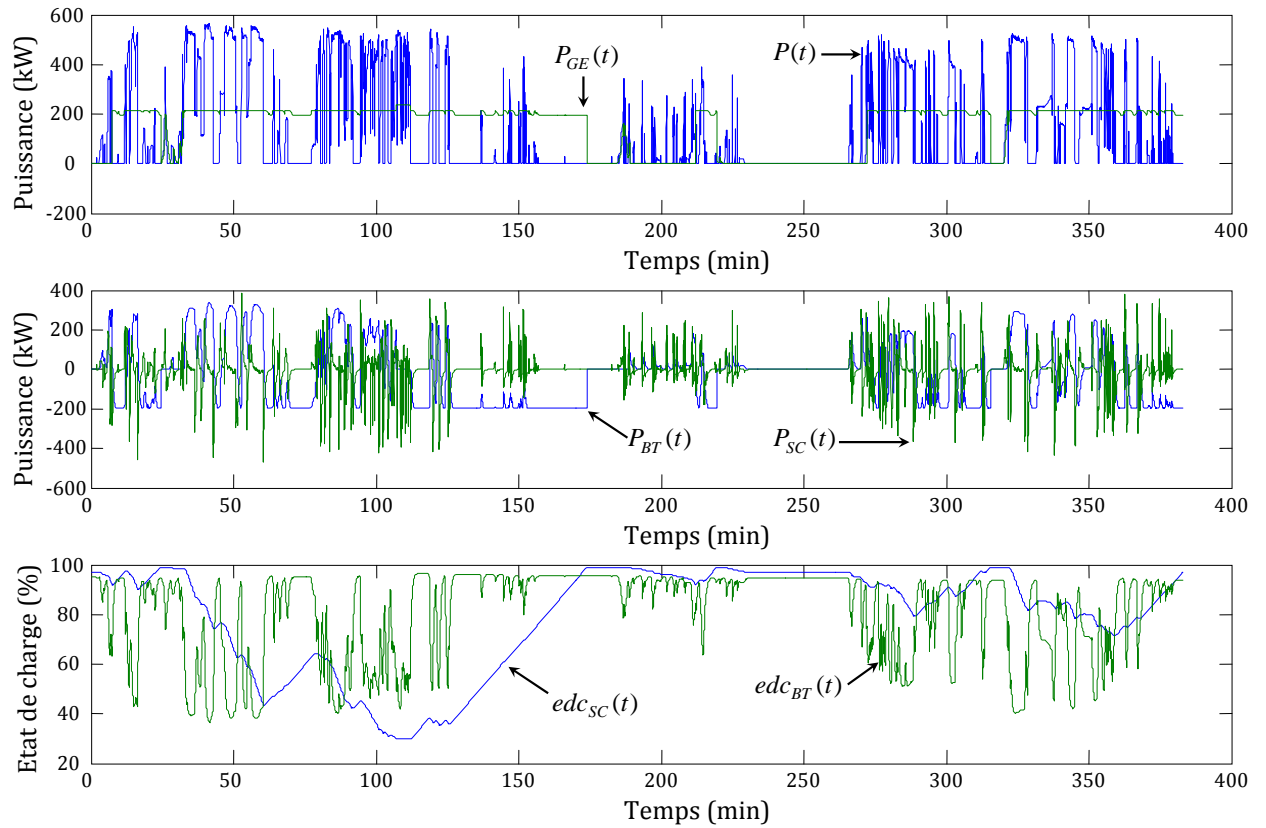


Fig. 4.35: LHyDIE sur la mission de desserte locale m_{11}

4.4 Dimensionnement électrique du démonstrateur LHyDIE

A la section précédente, nous avons présenté la configuration choisie par la SNCF pour le démonstrateur LHyDIE : un groupe de puissance nominale 215 kW, un pack de 1200 batteries de type FNC 1502 HR (135 Ah, 1.2 V) et un pack de 1600 supercondensateurs de type EPCOS 5000 F/2.5 V. Cette section aborde le dimensionnement électrique de LHyDIE. Nous présentons notamment la détermination de la disposition série/parallèle des packs de stockage, le choix de la tension du bus continu et le dimensionnement des convertisseurs. Mais ces trois problématiques présentent des interdépendances fortes qui rendent leur résolution très difficile. Une première sous-section d'analyse de la mission, ramenée à la cellule de stockage, servira de tremplin vers un dimensionnement électrique plus aisé.

4.4.1 Modèles électriques et analyse à l'échelle de la cellule de stockage

Nous montrons, dans cette sous-section, qu'il est possible à l'aide de modèles électriques statiques, de ramener à l'échelle de la cellule la mission de puissance destinée aux packs de stockage. Le modèle électrique moyen statique est un modèle très proche du modèle en flux de puissance, à la différence près qu'il traduit en grandeurs électriques (courant, tension) les flux de puissance échangés par les packs. Le qualificatif "moyen" traduit le temps de base de ce modèle, qui est égal à celui de la mesure de puissance consommée

(issue de la mission), c'est-à-dire une seconde. Ce modèle est statique par le fait qu'il n'intègre aucun élément physique dynamique ni d'organe de régulation ou de contrôle : les consignes de courant ou de puissance sont subies sans temps de réponse ni retard. L'objectif de ce modèle est la détermination des courants et tensions du système, afin de décider de la disposition des éléments de stockage et de calibrer les convertisseurs. Pour cela, nous avons ramené la mission à l'échelle de la cellule de stockage et mis en évidence les courants et tensions au niveau de l'élément de stockage. Ces données sont ensuite utilisées pour le dimensionnement électrique du démonstrateur LHyDIE.

La donnée de base, dans cette sous-section, est la mission de puissance dimensionnante de chacun des packs de stockage. La figure 4.36 montre les parts de missions des packs de stockage obtenues pour le démonstrateur LHyDIE sur la mission dimensionnante m_{11} . Les niveaux de puissance atteints sont :

$$\begin{cases} P_{dchmax} &= 380 \text{ kW} \\ P_{chmax} &= -192 \text{ kW} \\ P_{scmax} &= 475 \text{ kW} \end{cases} \quad (4.63)$$

◆ La cellule de batterie

En négligeant les pertes dans les convertisseurs, la puissance échangée par cellule de batterie vaut :

$$p_{bt} = \frac{1}{N_{BT}} P_{BT} \quad (4.64)$$

Cette puissance est tracée à la figure 4.37. Considérons un modèle électrique simplifié du type R,E de la cellule de batterie. Il s'agit d'une résistance r_{bt} en série avec une source de tension e_{bt} . L'annexe C.2 fournit les caractéristiques des batteries étudiées dans ce rapport. En particulier, la cellule de batterie FNC 1502 HR de 135 Ah, concernée dans ce chapitre est exposée à la section C.2.1 (page 226). Dans son modèle électrique, la résistance r_{bt} et la tension e_{bt} varient toutes deux en fonction de l'état de charge q (0 à 1) de la cellule. La figure 4.38 montre le modèle R,E et les cartographies de la résistance et de la tension⁽¹⁾. L'interpolation des points de mesures fournis par le fabricant nous a permis d'établir les équations suivantes :

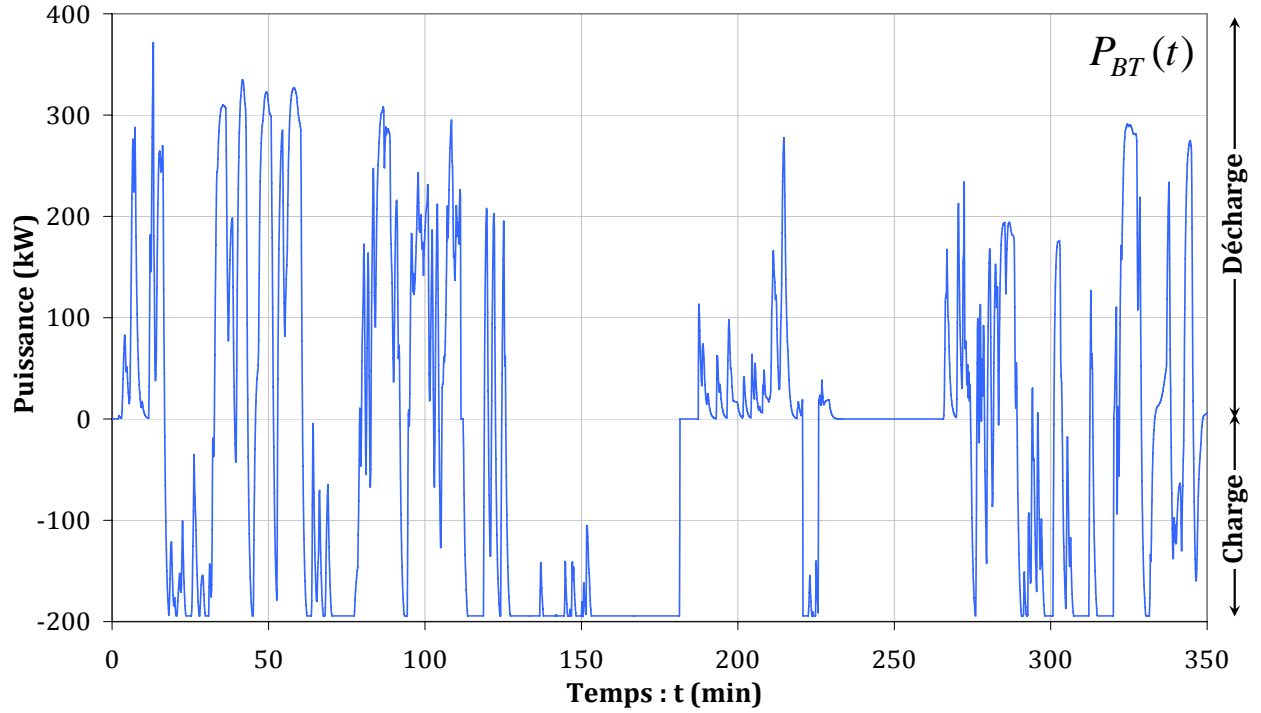
$$\begin{cases} r_{bt}(q) &= 2.83 - 12.88q + 24.88q^2 - 20.83q^3 + 6.28q^4 \\ e_{bt}(q) &= 0.99 + 1.06q - 1.82q^2 + 1.11q^3 \end{cases} \quad (4.65)$$

La figure 4.39 montre le format mathématique du modèle électrique de la cellule de batterie. La puissance p_{bt} est divisée par la tension v_{bt} ⁽²⁾ pour calculer le courant i_{bt} , d'après la relation :

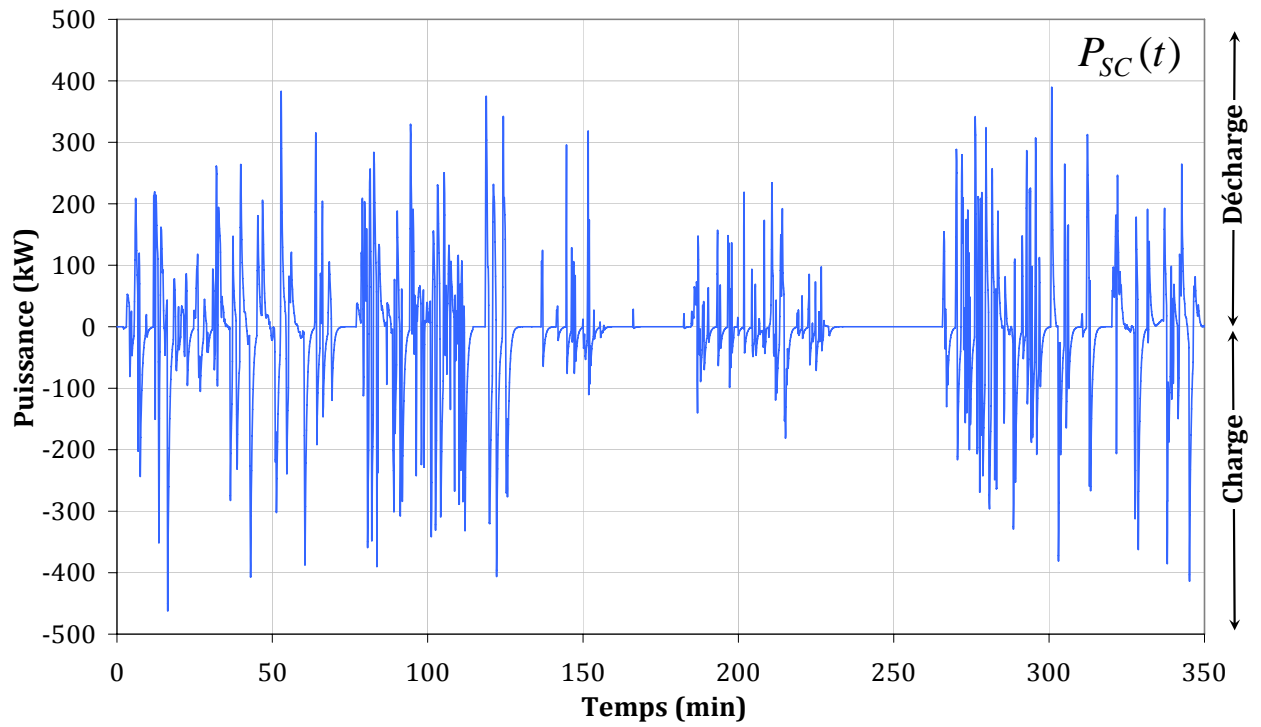
$$i_{bt} = \frac{1}{v_{bt}} p_{bt} \quad (4.66)$$

⁽¹⁾L'orientation du courant i_{bt} respecte la convention de signe (générateur) utilisée dans ce rapport.

⁽²⁾Dans le modèle mathématique, la tension v_{bt} permet d'avoir le courant i_{bt} qui, par la suite, permet de déterminer la tension v_{bt} : cela constitue une boucle algébrique insoluble. Pour éviter cela, la tension v_{bt} est retardée d'un pas de calcul et devient v_{bt}^* . Néanmoins, pour ne pas alourdir inutilement la rédaction, nous utilisons v_{bt} à la place v_{bt}^* .



(a) Mission de puissance du pack de batteries embarqué sur LHyDIE



(b) Mission de puissance du pack capacitif embarqué sur LHyDIE

Fig. 4.36: Répartition de la mission dimensionnante m_{11} aux packs de stockage de LHyDIE

Le courant i_{bt} est ensuite intégré pour calculer la capacité Q_{bt} correspondante. Nous désignons par $C_5^{(1)}$ la capacité nominale de la cellule (dans notre cas elle vaut 135 Ah). La capacité Q_{bt} calculée est normalisée et devient q .

$$q(t) = q_0 - \frac{1}{C_5} \int_0^t i_{bt}(\tau) d\tau \quad (4.67)$$

⁽¹⁾Notation standard utilisée par les spécialistes des batteries.

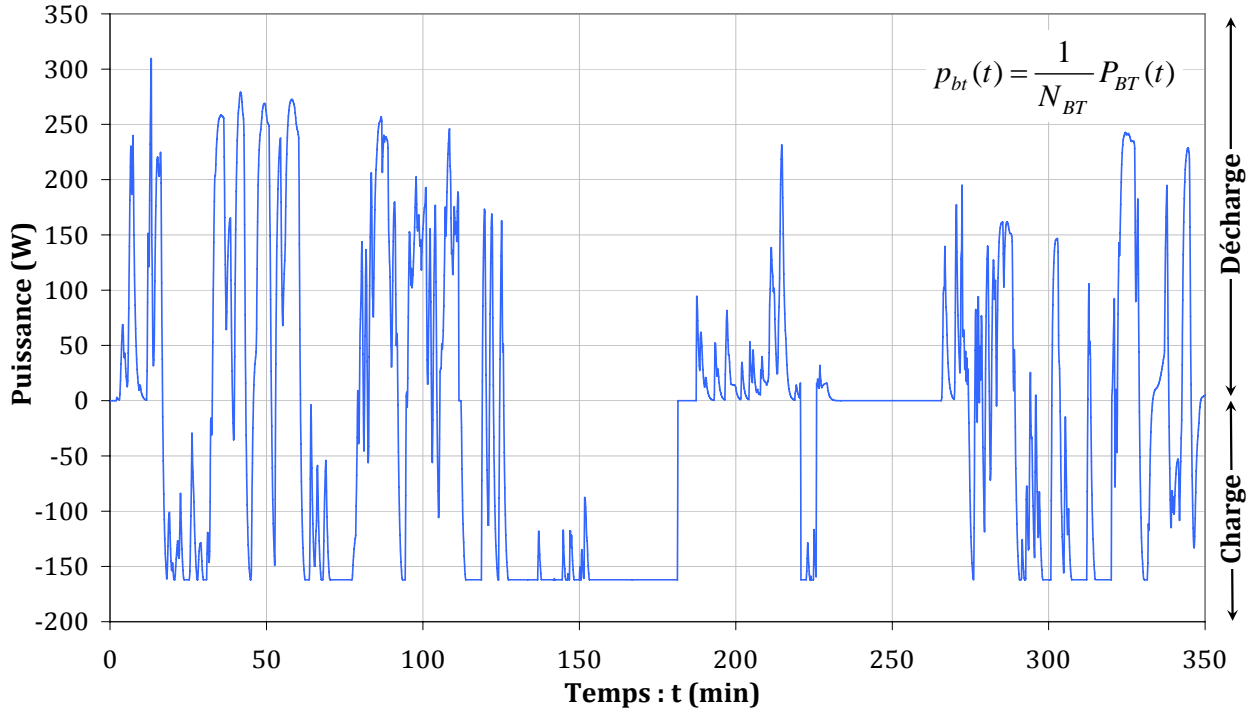


Fig. 4.37: Mission de puissance ramenée à la cellule de batterie

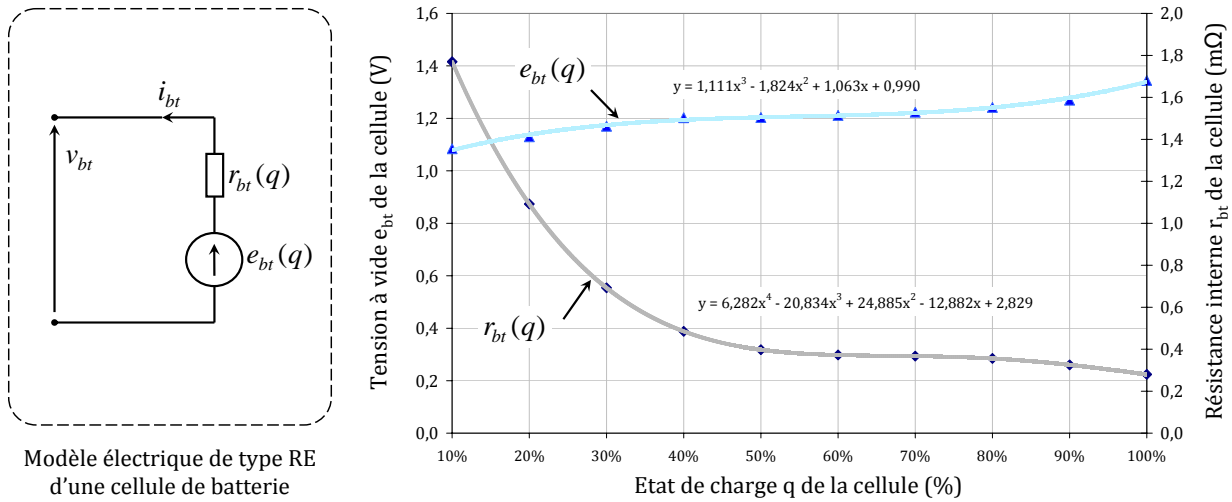


Fig. 4.38: Circuit électrique équivalent de type RE d'une cellule de batterie

Nous utilisons ensuite les cartographies $r_{bt}(q)$ et $e_{bt}(q)$ pour estimer la résistance r_{bt} et la tension e_{bt} . La tension de la cellule se déduit alors, conformément à la convention signe utilisée dans ce rapport, par :

$$v_{bt} = e_{bt}(q) - r_{bt} \times i_{bt} \quad (4.68)$$

La simulation du modèle de la figure 4.39 avec la mission de puissance m_{11} ramenée à la cellule de batterie (p_{bt}), nous donne, à la figure 4.40, les courbes de tension $v_{bt}(t)$ et de

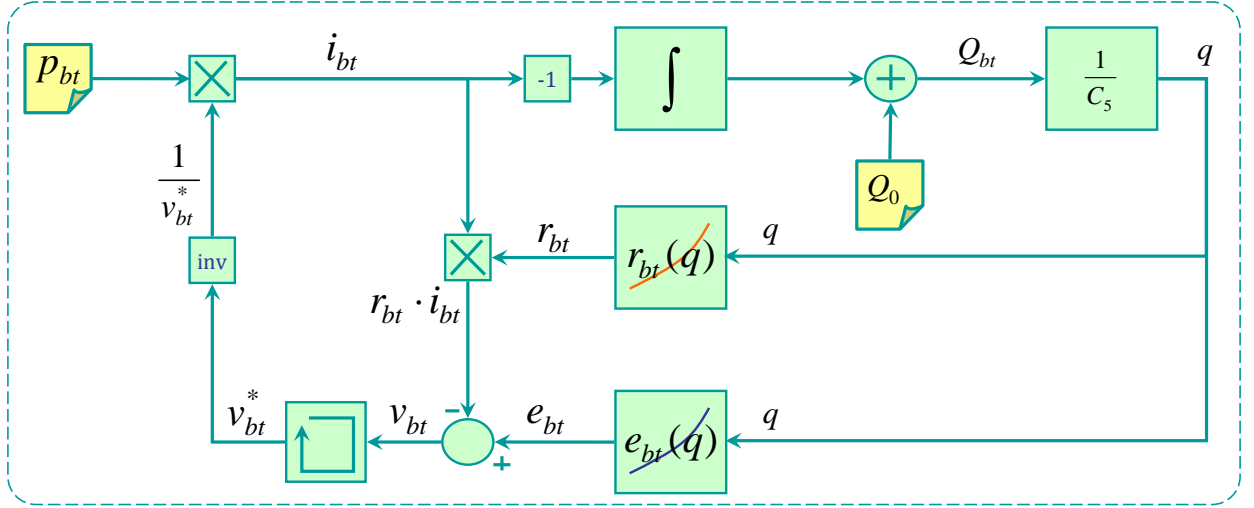


Fig. 4.39: Format mathématique du modèle électrique d'une cellule de batterie

courant $i_{bt}(t)$ sur la cellule de batterie. Les courants maxima de charge et de décharge valent :

$$\begin{cases} i_{dchmax} = \max(i_{bt}) = 415 \text{ A} \\ i_{chmax} = \min(i_{bt}) = -156 \text{ A} \end{cases} \quad (4.69)$$

Ces valeurs dépassent les limitations de base $2.5 \times C_5$ (337.5 A) et $-1 \times C_5$ (-135 A) que nous avons fixées au chapitre 3 (§3.6.2, page 81). Notons que nous avons dû repousser les limitations de courants de charge et de décharge pour passer (en simulation) cette mission. Cela est dû au fait qu'il n'y a que 1200 batteries au lieu de 1721 batteries. Sachant que ces limitations ne sont violées que pour cette mission particulièrement difficile, dont l'occurrence n'est pas régulière⁽¹⁾, une légère dégradation de cette dernière suffit pour respecter les limitations de courants. Néanmoins, pour parer à toute éventualité, nous utiliserons les maxima de courants donnés ci-dessus pour le dimensionnement des convertisseurs. En plus des maxima de courant, les maxima de tension interviennent dans le dimensionnement électrique de la locomotive.

$$\begin{cases} v_{btmax} = \max(v_{bt}) = 1.59 \text{ V} \\ v_{btmin} = \min(v_{bt}) = 1.05 \text{ V} \end{cases} \quad (4.70)$$

♦ La cellule de supercondensateur

Nous appliquons la même démarche aux supercondensateurs. La puissance par cellule est représentée à la figure 4.41. Considérons le modèle électrique simplifié de type R,C de la cellule de supercondensateur : il s'agit d'une résistance r_{sc} en série avec une capacité C_R , comme le montre la figure 4.42. L'annexe C (§C.3, page 234) fournit les caractéristiques du supercondensateur EPCOS 5000 F/2.5 V étudié dans ce rapport.

La puissance p_{sc} est divisée par la tension v_{sc} ⁽²⁾ pour calculer le courant i_{sc} , d'après la

⁽¹⁾LHyDIE est prioritairement destinée aux triages et aux dessertes légères.

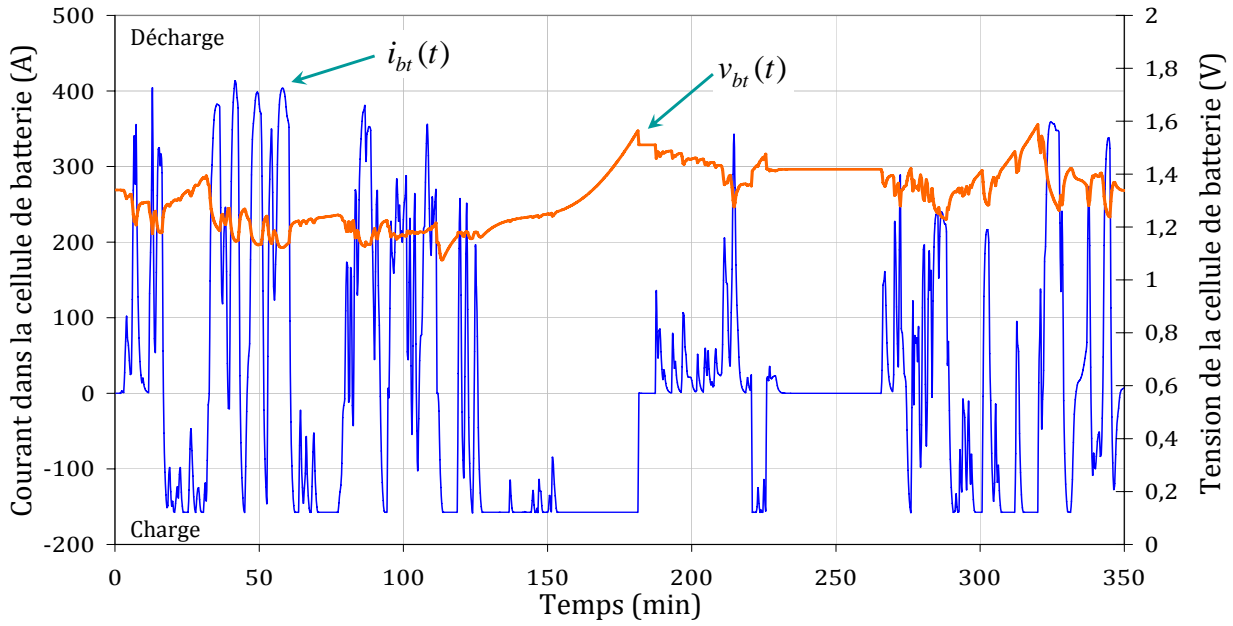


Fig. 4.40: Evolution du courant et la tension sur une cellule de batteries

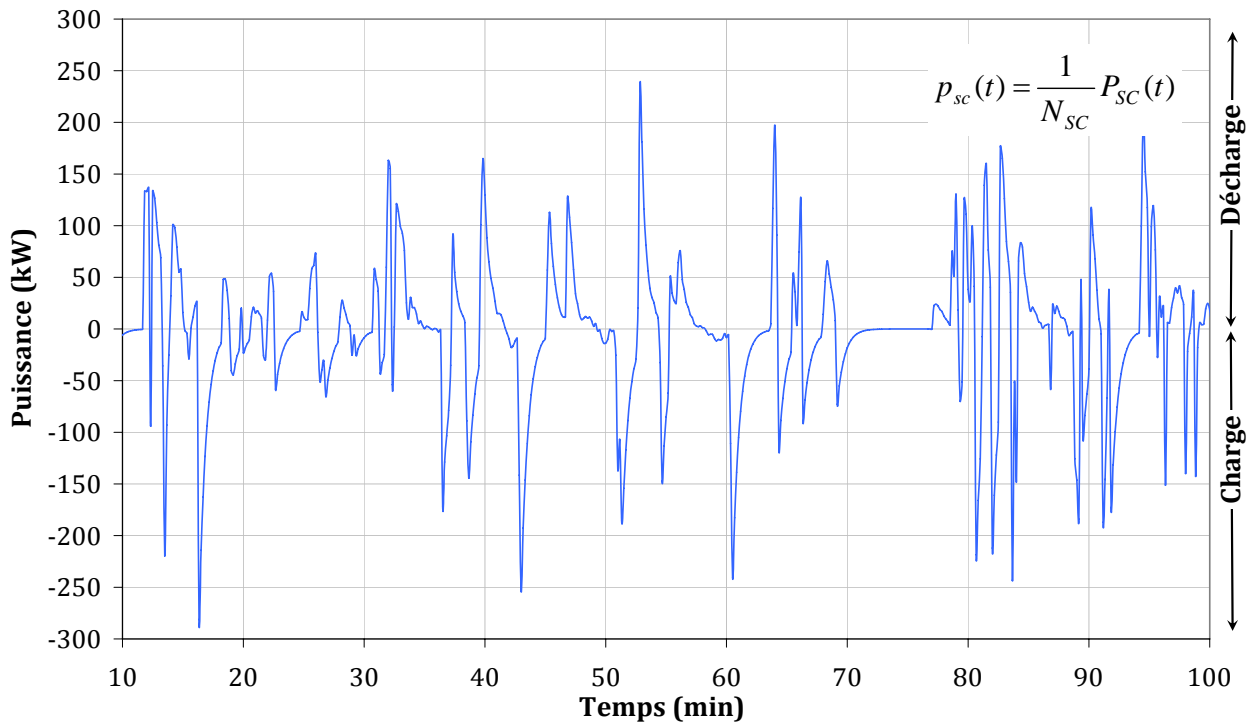


Fig. 4.41: Mission de puissance ramenée à la cellule de supercondensateur

relation :

$$i_{sc} = \frac{1}{v_{sc}} p_{sc} \quad (4.71)$$

⁽²⁾Dans le modèle mathématique, la tension v_{sc} permet d'avoir le courant i_{sc} qui par la suite permet de déterminer la tension v_{sc} : cela constitue une boucle algébrique insoluble. Pour éviter cela, la tension v_{sc} est retardée d'un pas de calcul et devient v_{sc}^* . Néanmoins, pour ne pas alourdir inutilement les calculs, nous utilisons v_{sc} à la place v_{sc}^* .

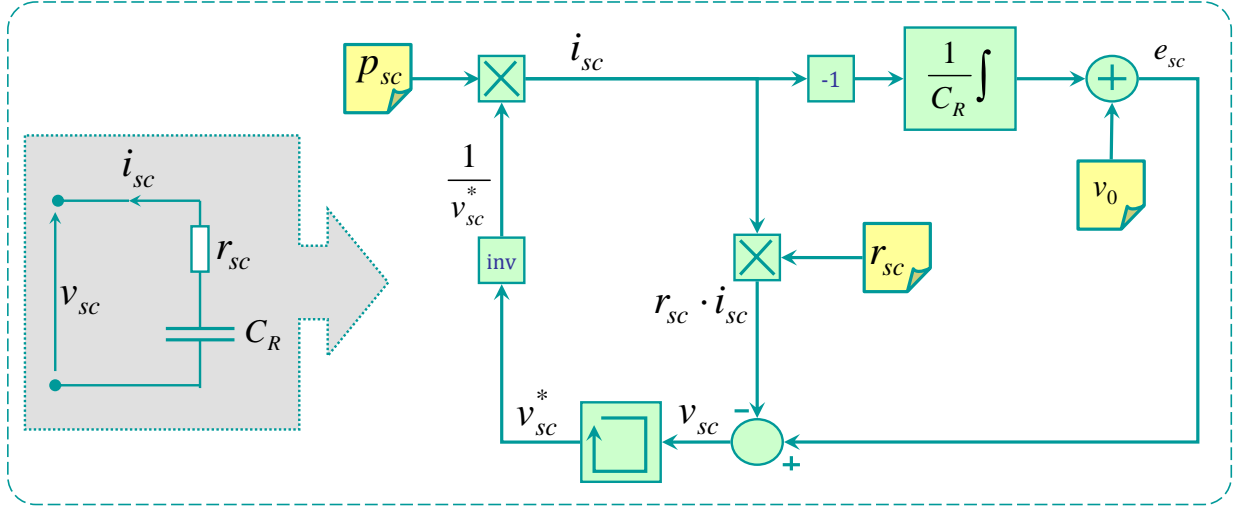


Fig. 4.42: Modèle électrique de type RC d'un supercondensateur

Le courant i_{sc} est ensuite intégré pour calculer la tension v_c aux bornes de la capacité.

$$v_c(t) = v_0 - \frac{1}{C_R} \int_0^t i_{sc}(\tau) d\tau \quad (4.72)$$

La prise en compte de la résistance interne permet d'avoir la tension v_{sc} .

$$v_{sc} = v_c(t) - r_{sc} \times i_{sc} \quad (4.73)$$

La simulation du modèle de la figure 4.42 avec la mission de puissance ramenée à la cellule de supercondensateur p_{sc} nous donne, à la figure 4.43, les courbes de tension $v_{sc}(t)$ et de courant $i_{sc}(t)$ sur la cellule de supercondensateur. Le courant maximum, charge et décharge confondus, vaut :

$$i_{sc\max} = \max(|i_{sc}|) = 173 \text{ A} \quad (4.74)$$

Ce courant est bien inférieur au maximum disponible dans le supercondensateur ($> 800 \text{ A}$). En plus de ce courant, les maxima de tension interviennent dans le dimensionnement électrique de la locomotive.

$$\begin{cases} v_{sc\max} &= \max(v_{sc}) = 2.51 \text{ V} \\ v_{sc\min} &= \min(v_{sc}) = 1.32 \text{ V} \end{cases} \quad (4.75)$$

Dans cette sous-section, nous avons développé de nouveaux modèles électriques statiques, que nous avons couplés avec les missions des packs stockage issues du modèle d'analyse en flux de puissance de la locomotive. Ces modèles électriques statiques, nous ont permis de ramener la mission du pack, à l'échelle de l'élément. Nous voulons insister sur le caractère indispensable de cette sous-section dans la démarche de conception. En effet, il est difficile, voire impossible, sans avoir déterminé l'organisation des éléments, de convertir le flux de puissance en grandeurs électriques (courant, tension). Le fait de ramener le problème à l'échelle de la cellule de stockage nous permis de contourner cette

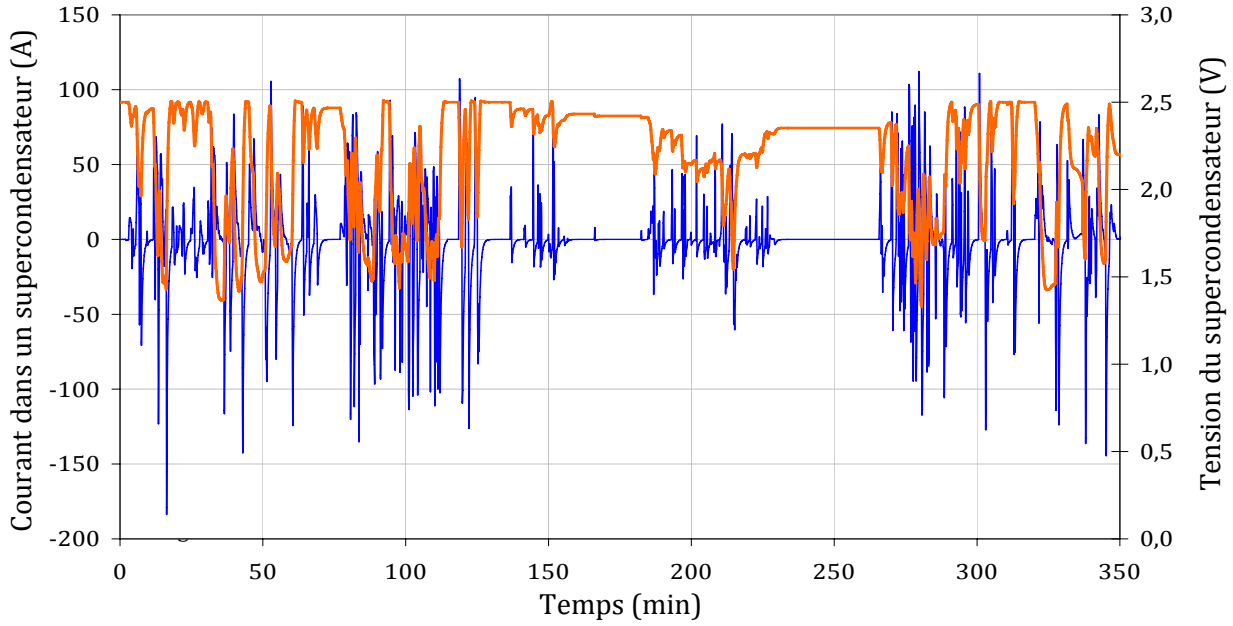


Fig. 4.43: Evolution du courant et la tension sur un élément supercondensateur

difficulté. Les courants et tensions calculés pour une cellule nous permettrons de remonter aux packs, dans la sous-section suivante, pour dimensionner la disposition série/parallèle des éléments de stockage et les convertisseurs associés.

4.4.2 Tension du bus continu et disposition des éléments

La figure 4.44 montre, pour le pack de batteries, le schéma d'organisation des éléments. Les N_{BT} batteries sont rangées en $N_{p_{BT}}$ modules parallèles, constitués chacun de $N_{s_{BT}}$ éléments en série. Chaque module dispose de son hacheur⁽¹⁾. Théoriquement, N_{BT} est le produit de $N_{s_{BT}}$ par $N_{p_{BT}}$ ⁽²⁾. Chaque élément de batterie conduit un courant i_{bt} et admet une tension v_{bt} (calculés à la section précédente). Virtuellement, le courant total I_{BT} circulant dans le pack et la tension totale V_{BT} du pack sont donnés par :

$$\begin{cases} I_{BT} &= N_{p_{BT}} \times i_{bt} \\ V_{BT} &= N_{s_{BT}} \times v_{bt} \end{cases} \quad (4.76)$$

⁽¹⁾Pour éviter des problèmes de déséquilibre de courant, nous avons choisi d'éviter un regroupement de modules en parallèle sous le même hacheur. Par ailleurs, même pour un seul module, le hacheur peut être constitué de plusieurs bras parallèles entrelacés. Nous abordons en détail la structure des convertisseurs à la sous-section suivante.

⁽²⁾Théoriquement seulement, car en réalité il est difficile de réaliser l'égalité systématique entre un entier et le produit de deux autres entiers. Nous allons procéder comme si ces variables étaient des réels, en les arrondissant au besoin.

Par ailleurs, afin de profiter de toute la plage de variation de l'état de charge des packs, surtout du pack de supercondensateurs dont la tension varie dans de larges proportions, les convertisseurs sont abaisseurs, du bus aux éléments⁽¹⁾, ce qui impose que :

$$V_{BUS} > V_{BT} \quad (4.77)$$

Plus encore, nous avons choisi de borner le rapport cycle des hacheurs entre α_{\min} (7%) et α_{\max} (93%)⁽²⁾. Ces valeurs sont couramment pratiquées et leur justification ne nous paraît pas indispensable. Retenons qu'il est toujours possible de réajuster ces limitations de rapport cyclique, si cela s'impose par la suite. De fait,

$$\alpha_{\min} V_{BUS} \leq V_{BT} \leq \alpha_{\max} V_{BUS} \quad (4.78)$$

Soit, d'après Eq.4.76 :

$$\alpha_{\min} V_{BUS} \leq N_{S_{BT}} \times v_{bt} \leq \alpha_{\max} V_{BUS} \quad (4.79)$$

Plus concrètement, la condition Eq.4.78 s'écrit :

$$\frac{\alpha_{\min}}{v_{bt\min}} V_{BUS} \leq N_{S_{BT}} \leq \frac{\alpha_{\max}}{v_{bt\max}} V_{BUS} \quad (4.80)$$

Les variables $v_{bt\min}$ et $v_{bt\max}$ sont respectivement les bornes inférieure et supérieure du profil de tension $v_{bt}(t)$ calculé pour un élément de batterie. Elles sont introduites à la section précédente. Désignons par $N_{S_{BT\min}}$ et $N_{S_{BT\max}}$, les valeurs limites du nombre de cellules en série.

$$\begin{cases} N_{S_{BT\min}} = \frac{\alpha_{\min}}{v_{bt\min}} V_{BUS} \\ N_{S_{BT\max}} = \frac{\alpha_{\max}}{v_{bt\max}} V_{BUS} \end{cases} \quad (4.81)$$

Avec les valeurs numériques établies à la section précédente : $v_{bt\min} = 1.05$ V et $v_{bt\max} = 1.59$ V, et avec la limitation du rapport cyclique entre 7% et 93%, il est facile, une fois la tension de bus choisie, de calculer grâce à l'équation Eq.4.81, les valeurs limites du nombre d'éléments en série dans le pack de batteries.

En entreprenant la même démarche avec les supercondensateurs, nous avons établi :

$$\begin{cases} N_{S_{SC\min}} = \frac{\alpha_{\min}}{v_{sc\min}} V_{BUS} \\ N_{S_{SC\max}} = \frac{\alpha_{\max}}{v_{sc\max}} V_{BUS} \end{cases} \quad (4.82)$$

⁽¹⁾ L'utilisation de convertisseurs éleveurs, du bus aux éléments, limiterait la plage de variation de la tension des supercondensateurs.

⁽²⁾ Le choix de ces limitations est motivé par la considération du temps mort entre les commutations des IGBTs et des fréquences de découpage traditionnellement pratiquées dans des applications similaires. Ces limitations ont été obtenues par ajustage a posteriori.

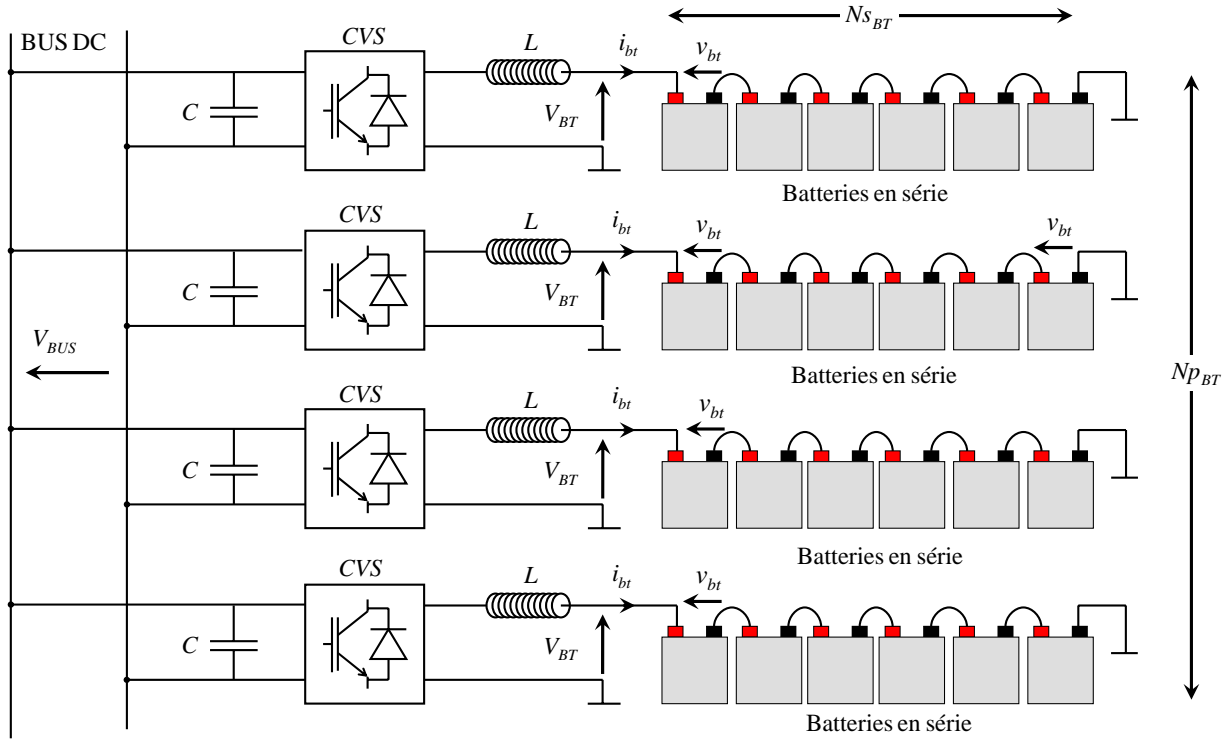


Fig. 4.44: Disposition des cellules de batteries dans le pack

Avec les valeurs numériques établies à la section précédente : $v_{s\min} = 1.32 \text{ V}$ et $v_{s\max} = 2.51 \text{ V}$, et avec la limitation du rapport cyclique entre 7% et 93%, il est possible, une fois la tension de bus choisie, de calculer grâce à l'équation Eq.4.82 les valeurs limites du nombre d'éléments en série dans le pack de supercondensateurs.

Notons par ailleurs, pour des raisons de sécurité, que les autorités de la SNCF nous ont imposé que le démonstrateur reste de classe 3, c'est-à-dire qu'aucune tension à bord de l'engin ne dépasse la valeur limite de $750 \text{ V}^{(1)}$. De fait la tension du bus doit rester en dessous de 750 V . En prenant une marge⁽²⁾ de 100 V par rapport à cette tension limite, nous avons :

$$V_{\text{BUS}} \leq 650 \text{ V} \quad (4.83)$$

En considérant que le groupe Diesel embarqué délivre une tension alternative normalisée de 380 volts entre phases, la SNCF a décidé que la tension du bus continu doit correspondre à la tension composée 380 V redressée (double alternance), soit 540 V continu. Ce choix, pratiquement arbitraire, n'est pas vraiment l'idéal. Nous montrons au chapitre 6 sur l'optimisation que ce choix n'est pas optimal, selon le critère de volume des convertisseurs. L'idéal serait de prendre la valeur maximale possible, c'est-à-dire 650 V pour la tension de bus, afin de minimiser les pertes dans les convertisseurs et de réduire la taille

⁽¹⁾Au-delà de 750 V et jusqu'à 2000 V , la locomotive passe dans la classe 4 et sa maintenance nécessiterait des précautions spécifiques.

⁽²⁾Une marge de 100 V garantit, sauf accident grave, que même en cas de surtension, la tension de bus continu reste dans les limites fixées par la norme.

des dissipateurs thermiques. Néanmoins, nous continuons la conception sur la base de ce choix. D'après les équations Eq.4.81 et Eq.4.82, avec une tension de bus continu régulée à 540 V, nous avons :

$$\begin{cases} 37 \leq N_{s_{BT}} \leq 366 \\ 4 \leq N_{p_{BT}} \leq 33 \\ N_{s_{BT}} \times N_{p_{BT}} \approx 1200 \end{cases} \quad \begin{cases} 31 \leq N_{s_{SC}} \leq 200 \\ 8 \leq N_{p_{SC}} \leq 52 \\ N_{s_{SC}} \times N_{p_{SC}} \approx 1600 \end{cases} \quad (4.84)$$

Le choix de la tension de bus de 540 V impose un nombre maximum de modules en série, soit un nombre minimum de modules en parallèle fixé à 4 pour le pack de batteries et 8 pour le pack de supercondensateurs. La SNCF a choisi la configuration :

$$\begin{cases} N_{s_{BT}} = 300 & N_{p_{BT}} = 4 \\ N_{s_{SC}} = 200 & N_{p_{SC}} = 8 \end{cases} \quad (4.85)$$

La figure 4.45 montre la configuration électrique de LHyDIE. Le démonstrateur embarque 8 modules de supercondensateurs et 4 modules de batteries équipés chacun de son hacheur. Les contraintes de courant et de tension sont illustrées sur la figure 4.45. Au vu de ces résultats, la SNCF a décidé de standardiser les convertisseurs pour faciliter la production, cette solution permettant par ailleurs une grande modularité et interchangeabilité des modules⁽¹⁾. De fait, le seul hacheur dimensionné est celui subissant la plus forte contrainte : il s'agit du hacheur de modules batteries intercalé entre une tension de bus de 540 V et une tension de module variant entre 315 V et 477 V. Le courant en sortie de ce hacheur est de 415 A en décharge et -156 A en charge. Ces données sont utilisées pour le dimensionnement des convertisseurs et des éléments passifs associés.

4.4.3 Dimensionnement des hacheurs et les éléments de filtrage

La conception et le développement des hacheurs de stockage ont été confiés à l'INRETS, sur la base des courants et tensions caractéristiques que nous avons calculés à la sous-section précédente. Néanmoins, pour les besoins de la phase d'optimisation, nous avons abordé en détails, au chapitre 6, les questions de dimensionnement pour la conception optimale des convertisseurs. Dans ce chapitre-ci, en l'occurrence, dans la présente sous-section, nous présentons quelques détails relatifs au dimensionnement des convertisseurs.

◆ Hacheurs entrelacés

La figure 4.46 montre la structure du hacheur de stockage à trois bras entrelacés, proposé par l'INRETS. Chaque bras de hacheur est muni d'une inductance de lissage de courant (L) et d'une capacité de découplage (C) en entrée. Les courants par bras sont $(i_{sj})_{j=1,2,3}$ et la somme des courants fait :

$$I_s = \sum_{j=1,2,3} i_{sj} \quad (4.86)$$

⁽¹⁾LHyDIE étant une locomotive de démonstration, des évolutions futures sont prévisibles. Une standardisation des hacheurs permettrait des remplacements entre modules de supercondensateurs et modules de batteries. Par ailleurs, la standardisation est aussi un gain de temps de développement. Mais elle est loin d'être optimale.

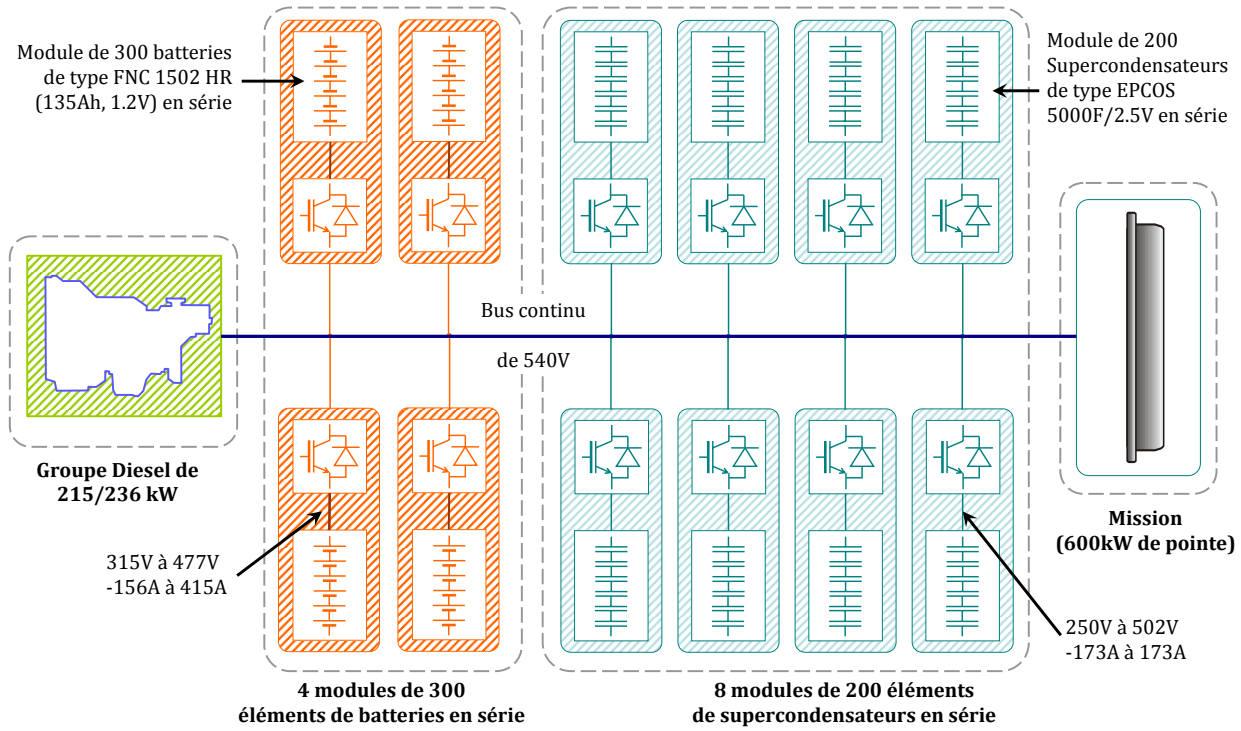


Fig. 4.45: Configuration électrique du démonstrateur LHyDIE

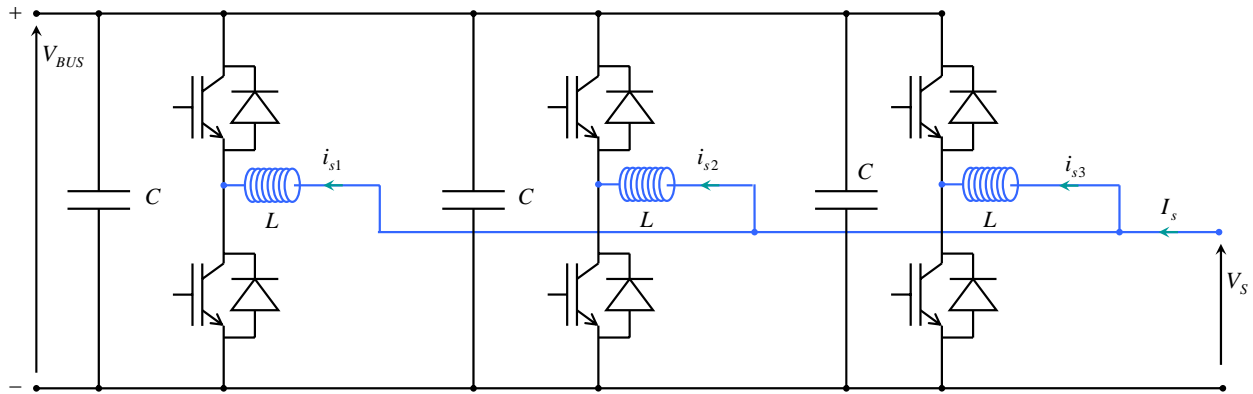


Fig. 4.46: Structure du convertisseur de stockage à plusieurs bras entrelacés

L'intérêt de l'entrelacement est la réduction des ondulations de courant obtenue par décalage angulaire (ici $2\pi/3$) des signaux de commande, d'un bras à l'autre [49]. Comme le montre la figure 4.47, la fréquence de découpage apparente du courant I_s vaut trois fois celle réelle des courants de bras $(i_{sj})_{j=1,2,3}$. A l'aide de modèles électriques instantanés, nous avons établi que la réduction des ondulations de courant :

$$r_{ond} = \frac{\Delta I_s}{\Delta i_s} \quad (4.87)$$

évolue en fonction du rapport cyclique α (figure 4.47). Sachant que la tension du pack du module de batteries varie entre 315 V et 477 V (α évolue entre 0.58 et 0.88), nous établissons que le gain maximal d'ondulation vaut $r_{ond}=0.75$ (pour le pire des cas, c'est-à-dire $\alpha =$

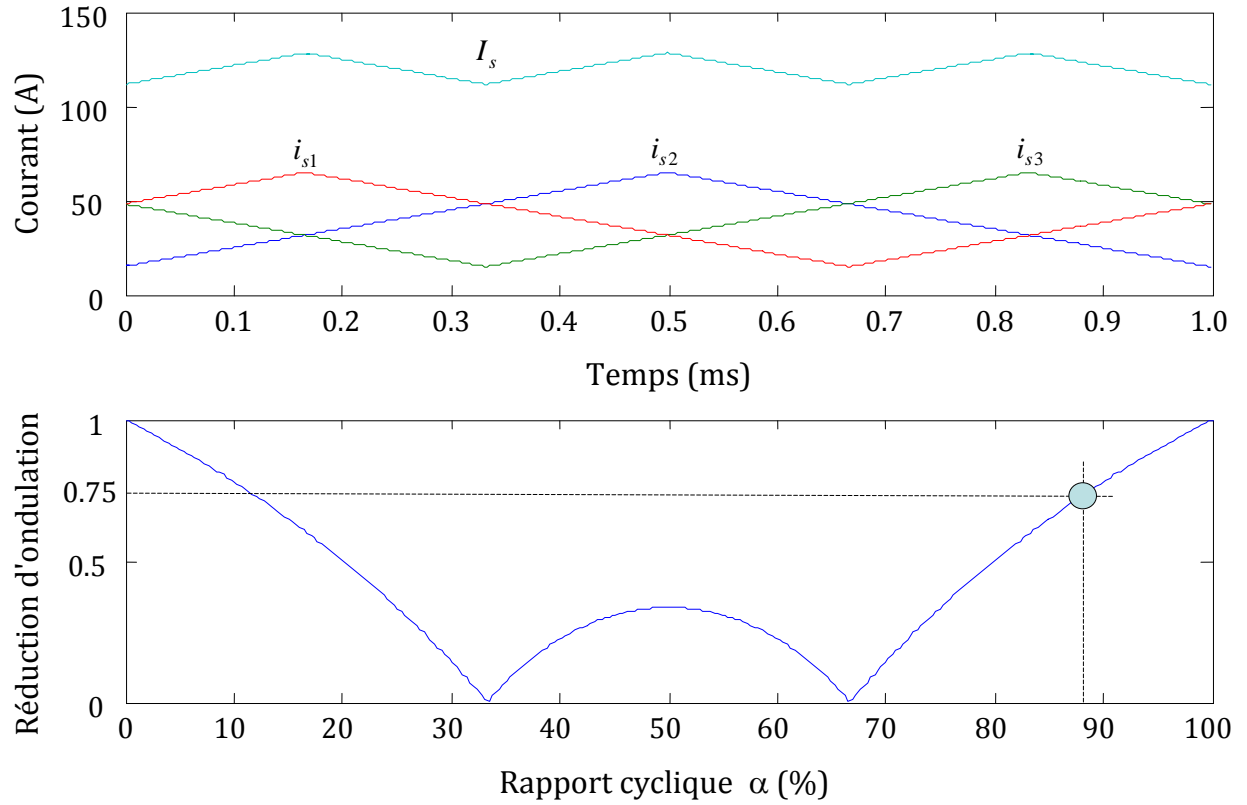


Fig. 4.47: Courants dans un hacheur à trois bras entrelacés

0.88). Ce gain est assez faible pour un entrelacement à trois bras. C'est, encore une fois, le choix de la tension de bus et du nombre d'éléments en série qui est en cause. Au chapitre 6, nous montrerons que ces choix doivent s'inscrire dans une démarche d'optimisation globale.

◆ Ondulations de courant et de tension

La proposition de l'INRETS pour le dimensionnement des hacheurs de stockage est la suivante :

- Le bras de hacheur est un IGBT Dual FF450R12ME3 (1200 V, 450 A) de EUPEC-Infineon (cf. §C.4) ;
- Les inductances de lissage font (L) 600 μ H chacune ;
- Les capacités d'entrée font (C) 600 μ F chacune ;
- La fréquence de découpage vaut (F_{dec}) 2 kHz.

Normalement, l'ondulation de courant est maximale pour $\alpha = 0.5$. Étant donné que α évolue entre 0.58 et 0.88, l'ondulation maximale est obtenue pour la valeur critique $\alpha_{cr} = 0.58$. L'ondulation maximale de courant par bras vaut [49] :

$$\Delta i_s = \frac{\alpha_{cr}(1 - \alpha_{cr})V_{BUS}}{L \times F_{dec}} = \frac{0.58 \times 0.42 \times 540}{600e^{-6} \times 2e^3} = 110 \text{ A} \quad (4.88)$$

L'ondulation maximale du courant global vaut :

$$\Delta I_s = r_{ond} \times \Delta i_s = 0.75 \times 110 \text{ A} = 83 \text{ A} \quad (4.89)$$

Lorsque le courant global prend sa valeur maximale de 415 A, le courant maximal par bras est de :

$$i_{s\max} = \frac{1}{3}I_{s\max} + \frac{1}{2}\Delta i_s = \frac{1}{3} \times 415 + \frac{1}{2} \times 83 = 180 \text{ A} \quad (4.90)$$

Ce courant est bien inférieur à la limite de 450 A admissible par les IGBTs.

L'ondulation maximale de tension en entrée de chaque bras vaut⁽¹⁾ :

$$\Delta V_{\text{BUS}} = \frac{\alpha_{\text{cr}}(1 - \alpha_{\text{cr}})i_s}{C \times F_{\text{dec}}} = \frac{0.58 \times 0.42 \times 415/3}{600e^{-6} \times 2e^3} = 28 \text{ V} \quad (4.91)$$

4.4.4 Conclusion

Dans cette section, nous avons procédé au dimensionnement électrique du démonstrateur LHyDIE. Nous avons présenté notamment la détermination de la disposition série/parallèle des packs de stockage et notre contribution au choix de la tension du bus DC ainsi au dimensionnement des convertisseurs. Quelques valeurs clés liées au dimensionnement des convertisseurs ont été présentées.

4.5 Conclusion

Ce chapitre vient compléter le chapitre 3 consacré à la synthèse du dimensionnement énergétique et de la gestion de la locomotive hybride. Nous avons présenté le modèle d'analyse en flux de puissance de la locomotive hybride. Ce modèle combiné à un jeu de cinq critères de faisabilité nous a permis d'évaluer et d'analyser les solutions issues de la phase de synthèse. A l'issue de cette analyse, nous avons présenté le choix de la configuration du démonstrateur LHyDIE. Nous avons aussi abordé dans ce chapitre un modèle plus détaillé que le modèle en flux de puissance, le modèle électrique statique, qui a permis, à partir des résultats des modèles en flux de puissance, d'aller plus loin dans la conception et de procéder au dimensionnement électrique du démonstrateur LHyDIE. Nous avons notamment déterminé la disposition série/parallèle des cellules de stockage et contribué au choix de la tension de bus continu ainsi qu'au dimensionnement des convertisseurs.

⁽¹⁾Normalement, il y a un effet bénéfique de l'entrelacement sur les ondulations de tension [49]. Nous raisonnons dans ce rapport, par souci de simplification, comme si les bras de hacheurs étaient complètement indépendants, du moins pour ce qui concerne les ondulations de tension.

Chapitre 5

Développement du contrôle-commande et de la gestion en temps réel

Au chapitre 3 de ce mémoire, nous avons synthétisé le dimensionnement et la gestion énergétiques de la locomotive hybride. A l'issue de cette première phase de synthèse, un ensemble Ω_{config} de 4800 configurations possibles a été retenu. Dans le chapitre 4, l'analyse de ces configurations, à travers une étude de faisabilité et de performance, nous a permis de réduire Ω_{config} à un ensemble Ω_{pareto} d'une trentaine de configurations optimales au sens de Pareto. A la suite de cette analyse, un choix de configuration a été fait : un groupe Diesel de 215/236 kW, 1200 batteries de type FNC 1502 HR et 1600 supercondensateurs de type EPCOS 5000 F/2.5 V, pour le démonstrateur LHyDIE. Ensuite, nous avons présenté le dimensionnement électrique de LHyDIE : choix de la tension du bus continu, disposition des éléments de stockage, dimensionnement des convertisseurs et des filtres associés.

Dans ce chapitre, nous abordons la dernière phase de la conception séquentielle par le développement du contrôle-commande et la mise en œuvre de la gestion en temps réel. Ce chapitre est organisé en plusieurs sections. La première (§5.1) fait l'état des lieux de quelques problématiques liées au contrôle-commande de la locomotive et à la mise en œuvre de la gestion en temps réel. Au nombre de ces problématiques, nous pouvons citer : la difficulté à estimer l'état de charge des batteries, l'auto-adaptation de la fréquence de filtrage des missions, la mise en œuvre de la compensation des pertes dans les supercondensateurs, etc. La deuxième section (§5.2) présente le modèle électrique dynamique moyen des modules de stockage et des convertisseurs associés. La section 5.3 présente l'architecture électrique globale, le calcul des régulateurs et le choix des bandes passantes. La section 5.4 aborde la gestion énergétique en temps réel. Nous présentons notamment les algorithmes décisionnels relatifs au pilotage du groupe Diesel et l'auto-adaptation du filtre des missions. Quelques résultats de simulation seront analysés à la section 5.5, puis vient la conclusion (§5.6).

5.1 État des lieux

Cette section fait l'état des lieux de quelques problématiques liées au contrôle-commande de la locomotive et la mise en œuvre de la gestion en temps réel. Nous présentons en 6 sous-sections les problématiques impliquées dans la mise au point du contrôle-commande et le développement de la gestion en temps réel. Afin de garder une clarté dans la rédaction de ce chapitre, plusieurs aspects seront simplifiés pour ne laisser paraître que les points critiques nécessaires à la compréhension de notre démarche.

5.1.1 Estimation de l'état de charge des batteries

Dans le modèle d'analyse en flux de puissance et le modèle électrique moyen statique développés au chapitre 4, nous avons supposé connu l'état de charge exact des packs de stockage. D'ailleurs, plusieurs fonctions telles que le contrôle dynamique de la charge et de la décharge ou encore la gestion du groupe Diesel sont basées sur la connaissance de l'état de charge des packs de stockage. En pratique, la mesure de la tension du pack de supercondensateurs permet d'en estimer l'état de charge, avec une faible erreur relative. Mais, dans le cas des batteries, la situation est beaucoup plus compliquée. En effet, pour une large plage de son état de charge (30% à 90%), la tension d'une batterie reste quasi-stationnaire (voir figure 4.38, page 148)⁽¹⁾, ce qui rend difficile l'estimation de l'état de charge des batteries à partir de la mesure de leur tension. De plus, la température a une influence sur la capacité et la tension des batteries. Plusieurs algorithmes existent qui permettent d'estimer l'état de charge des batteries à partir de l'historique du courant, de la tension et de la température [50, 51]. Mais ces algorithmes sont très complexes et demandent un paramétrage différent selon les technologies de batteries. Par conséquent, nous n'envisageons pas de les utiliser pour cette application. En général, on estime l'état de charge des batteries en calculant en temps réel l'énergie stockée, sur la base du modèle R,E de la batterie. Le calcul est réinitialisé à chaque fois que l'on repère la fin de charge (grâce à la tension de la batterie). Cette technique souffre de quelques insuffisances : d'une part, elle ne tient pas compte de la température ; d'autre part, l'estimation des pertes étant nécessairement approximative, plus on s'éloigne du point de repérage de la pleine charge, plus on s'écarte de l'état de charge réel des batteries. Pour prendre en compte cette incertitude sur l'estimation des états de charge, tous les étages de décision basés sur cette estimation prennent en compte le taux d'imprécision : par exemple $85\% \pm 2\%$ (soit 83% à 87%).

5.1.2 Auto-adaptation de la fréquence de filtrage

Nous avons mis en évidence, à la section 3.5.4 (page 78), que la fréquence de filtrage des missions, pour un nombre donné de supercondensateurs, varie selon la nature de la mission. En particulier, comme le montre la figure 5.1, avec les 1600 supercondensateurs du démonstrateur LHyDIE, la fréquence de filtrage évolue, selon la mission, entre 1 mHz

⁽¹⁾Les caractéristiques des batteries étudiées dans ce rapport sont données à l'annexe C.

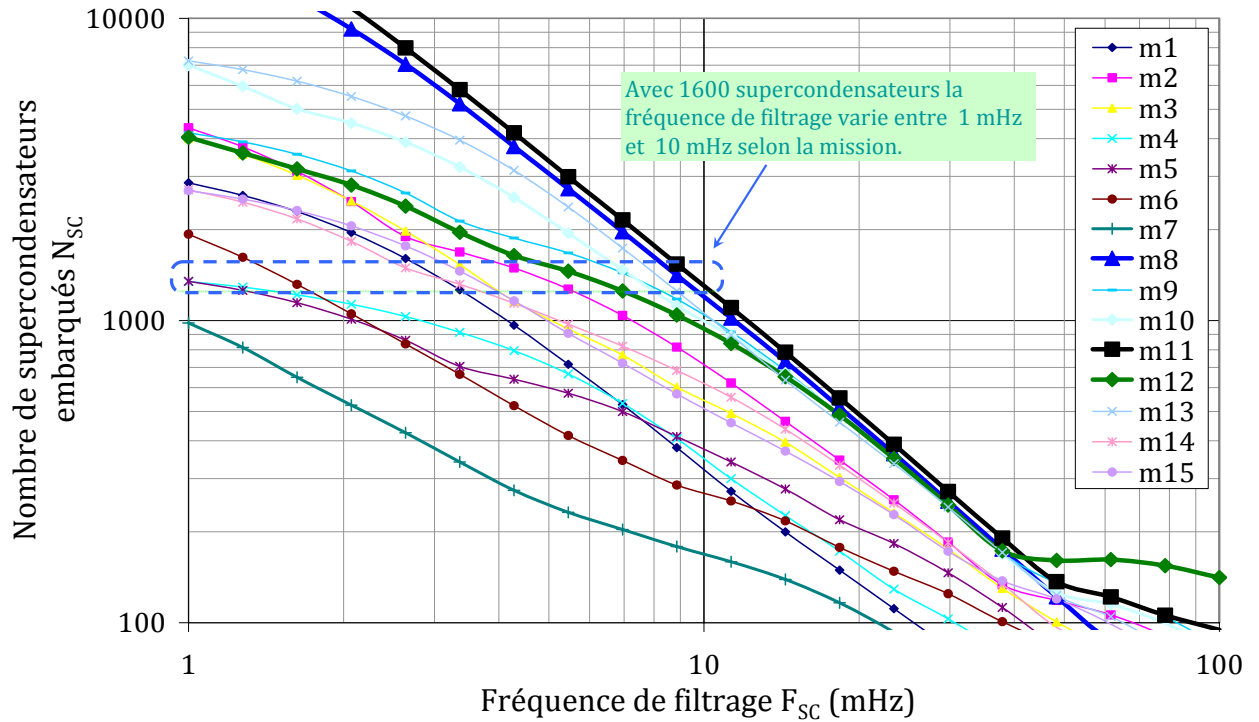


Fig. 5.1: Evolution de la fréquence de filtrage en fonction de la mission

et 10 mHz. Il est possible de figer cette fréquence définitivement à 10 mHz et passer l'ensemble des missions sans "taper" dans les butées énergétiques des supercondensateurs⁽¹⁾. Mais, dans ce cas, les supercondensateurs seront sous-utilisés lors des missions de triage. Pour optimiser, quelle que soit la mission, l'utilisation des supercondensateurs, il convient d'adapter la fréquence à cette mission. En outre, il peut arriver que l'un ou plusieurs des 8 modules de supercondensateurs soient défaillants. Dans ce cas, il est nécessaire, pour le bon fonctionnement de la locomotive, d'adapter la fréquence de filtrage aux modules de supercondensateurs restants.

Pour remédier à tous ces problèmes, nous avons développé un processus d'auto-adaptation de la fréquence de filtrage dont le but est d'une part de prendre en compte l'état de marche ou de défaillance des modules de supercondensateurs et d'autre part d'observer sur les modules en état de marche l'évolution de leur état de charge afin d'adapter en temps réel la fréquence de filtrage des missions. Ce processus est étudié à la section 5.4.2.

5.1.3 Compensation des pertes du pack de supercondensateurs

Rappelons que, dans les modèles de synthèse et d'analyse en flux de puissance, la compensation des pertes du pack de supercondensateurs est basée sur une estimation de ces dernières (cf. §3.5.2, page 72). Cette estimation est rendue possible par le fait que, dans ces modèles, les pertes énergétiques sont modélisées par des rendements moyens constants.

⁽¹⁾Il y a deux butées énergétiques : butée inférieure à 22% d'état de charge, butée supérieure à 97% d'état de charge.

Mais, dans la réalité, les pertes dans les convertisseurs et dans les éléments de stockage varient en fonction du courant les traversant, de la tension à leurs bornes et de la fréquence de découpage des hacheurs, ce qui en pratique rend difficile (voire impossible) leur estimation. Il serait hasardeux, dans la gestion en temps réel, de baser l'estimation des pertes sur le principe d'un rendement moyen. Une technique existe qui permet de contourner cette difficulté : l'idée est de contrôler la tension moyenne du pack de supercondensateurs afin de compenser la dérive de l'état de charge provoquée par les pertes [41]. Nous présentons ce système à la section 5.3.5.

5.1.4 L'équilibrage des états de charge entre modules de batteries

La problématique de l'équilibrage des états de charge est une conséquence de la modularité des dispositifs de stockage. En effet, comme le montre la figure 5.2, avec un module unique regroupant les 1200 éléments du pack de batteries, même si l'état de charge global est faible, le pack est capable de fournir la puissance maximale de décharge de 486 kW. Par contre, dans une configuration modulaire, pour un état de charge global identique (voire meilleur) que dans le cas précédent, un déséquilibre trop important entre les états de charge des modules peut amputer la puissance disponible⁽¹⁾. Cette observation nous a amenés à développer une stratégie d'équilibrage des états de charge entre modules de batteries. Cette stratégie consiste à pondérer la répartition de la mission entre les modules de batteries de façon à moins décharger les modules dont l'état de charge est faible.

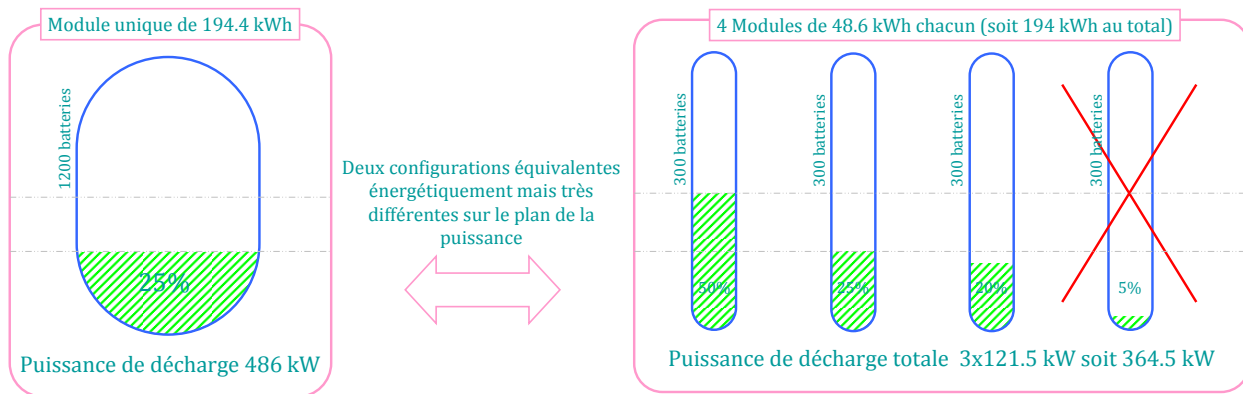


Fig. 5.2: Déséquilibre des états de charge entre modules de batteries

5.1.5 Gestion du groupe Diesel et des batteries

Plusieurs hypothèses faites dans les phases de synthèse et d'analyse, notamment concernant la gestion de la charge des batteries et la gestion du groupe Diesel, doivent être affinées dans cette phase de gestion en temps réel. En effet, jusqu'ici, nous avons choisi de charger les batteries systématiquement à C_5 au maximum. Or dans la pratique, il est sou-

⁽¹⁾En terme de capacité de puissance, il vaut mieux avoir tous les modules faiblement chargés que d'avoir un ou deux modules à plat et les autres bien chargés.

haitable que ce courant soit modulé en fonction de la sévérité⁽¹⁾ de la mission, du nombre de modules de batteries disponibles et surtout de l'état de charge global du pack de batteries. La charge à C_5 se justifie en cas de mission difficile, dans le cas où l'état de charge global est faible ou en cas de pertes de modules pour défaillance. Par exemple, lors d'une mission de triage, avec les 4 modules de batteries disponibles, il est préférable de ménager les batteries en réduisant leur courant de charge maximal à $2C_5/3$, à $C_5/2$ ou à $C_5/3$ en fonction de l'état de charge des modules.

Comme le montre la figure 5.3, nous avons développé deux profils de limitation du courant de charge des batteries. Le profil 1 est le profil de base :

- Lorsque l'état de charge du module est inférieur à 30%, il est urgent de recharger les batteries. Le courant de charge peut alors monter à C_5 .
- Lorsque l'état de charge du module évolue entre 30% et 40%, l'urgence pour recharger les batteries est moins importante et la limitation du courant de charge évolue linéairement entre C_5 à 30% et $2C_5/3$ à 40%.
- Lorsque l'état de charge du module évolue entre 40% et 60%, l'urgence à recharger les batteries s'amenuisant, la limitation du courant de charge vaut $2C_5/3$.
- Lorsque l'état de charge du module évolue entre 60% et 75%, il n'y a plus d'urgence à recharger les batteries donc la limitation du courant de charge peut descendre à $C_5/2$.
- Lorsque l'état de charge du module évolue entre 75% et 95%, d'une part, il n'y a plus d'urgence à recharger les batteries et d'autre part, à ce niveau de charge, les batteries doivent être ménagées d'où la limitation à $C_5/3$.
- Lorsque l'état de charge du module évolue entre 95% et 100%, sur les recommandations de Hoppecke, une procédure de fin de charge est lancée qui assure la charge par la tension (floating charge) avec compensation de la température.

La première conséquence de cette limitation plus restrictive des courants de charge est la dégradation de la mission du groupe Diesel. En effet, la réduction du courant de charge

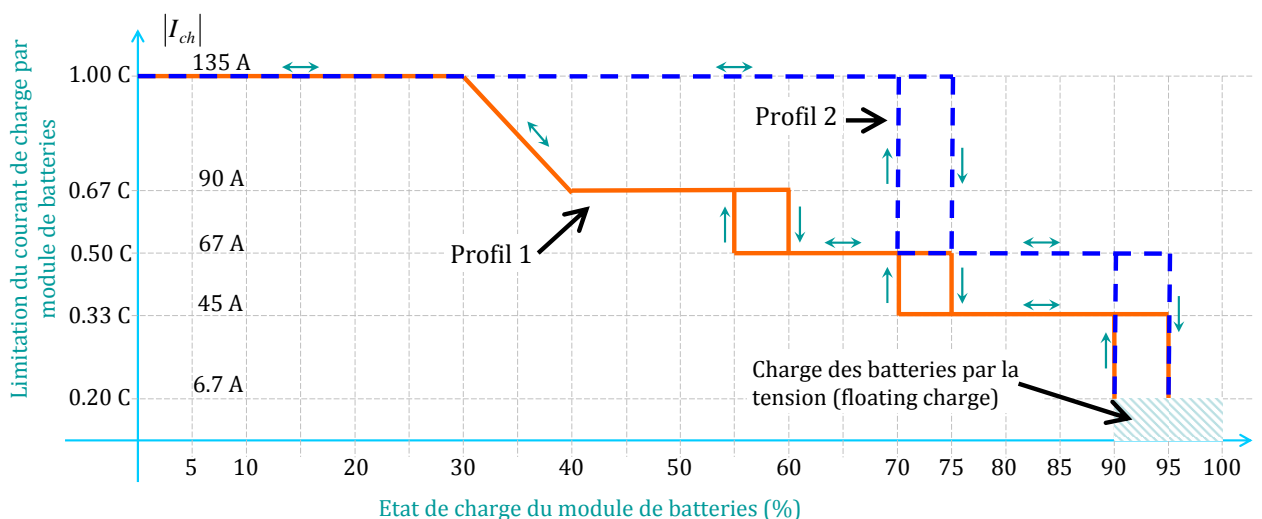


Fig. 5.3: Profils de la limitation du courant de charge par module de batteries

⁽¹⁾L'estimation de la sérénité de la mission est basée sur un calcul en temps réel de la moyenne glissante (sur 5 à 10 min) de la puissance consommée. Nous présentons ce calcul à la section 5.4.3

des modules de batteries entraîne le fonctionnement à faible charge du groupe Diesel lors des phases de recharge des batteries, ce qui dégrade la consommation de fuel. Plus concrètement, trois problématiques s'opposent : la sévérité de la mission, la durée de vie des batteries et la consommation de fuel. Le besoin en énergie utile de stockage des missions difficiles (dessertes locales) impose que les batteries soient chargées, en cours de mission, le plus rapidement possible à 100% (ou au moins à 95%). Or, compte tenu du profil de limitation de courant de charge, la charge des batteries à 100% impose, sur de longues durée, un fonctionnement au ralenti au groupe Diesel, ce qui dégrade la consommation de fuel.

En résumé, il est difficile voire impossible, de ménager les batteries, de réduire la consommation de fuel et de réduire la dégradation énergétique des missions, de façon simultanée. Un compromis intéressant basé sur l'observation des missions et le contrôle adaptatif des niveaux de charge des batteries nous a amenés à mettre en place le deuxième profil (profil 2) qui représente une alternative au premier, dans les cas de missions difficiles. Nous aborderons à la section 5.4.3 la logique aidant au choix de l'un ou l'autre des deux profils.

5.1.6 Quelle topologie électrique pour LHyDIE ?

La modularité du système énergétique de LHyDIE est sans aucun doute garante d'une certaine robustesse : nous estimons que, même en cas de défaillance de 2 sur 4 des modules de batteries et 4 sur 8 des modules de supercondensateurs, la locomotive LHyDIE est encore capable de réaliser des missions de triage. Mais cette modularité complexifie l'architecture l'électrique de la locomotive. En effet, avec plus de 13 sources indépendantes (4 modules de batteries, 8 modules de supercondensateurs et un groupe Diesel) connectées à un même bus continu, il est légitime de se poser la question : "qui fait quoi?". Il est indispensable d'attribuer selon les régimes (normaux ou dégradés) de LHyDIE une fonction précise à chacune des sources. L'attribution des fonctions de "source de courant" ou de "source de tension" sera traitée à la sous-section 5.3.1.

5.2 Modèle électrique dynamique moyen

La mise en œuvre de la gestion en temps réel nécessite un modèle dynamique plus fin que le modèle en flux de puissance et le modèle électrique statique. Sans être aussi détaillé qu'un modèle instantané, le modèle électrique dynamique moyen est un modèle électrique dans lequel les grandeurs physiques sont moyennées sur la période de découpage des hacheurs (d'où le qualificatif "moyen") et qui intègre les éléments physiques dynamiques et les organes de régulation ou de contrôle (d'où le qualificatif "dynamique").

Dans cette section, nous présentons les modèles électriques dynamiques moyens des modules de batteries et de supercondensateurs.

5.2.1 Module de batteries et hacheur associé

La figure 5.4 montre le circuit électrique équivalent d'un module de batteries et son hacheur à 3 bras entrelacés. A l'échelle temporelle d'une période de découpage, les ondulations de courant dans les bras de hacheur sont suffisamment filtrées pour qu'on puisse écrire, sous réserve d'un équilibrage parfait des moyennes des courants de bras⁽¹⁾,

$$I_{BT} \approx 3 \times i_{s1} \approx 3 \times i_{s2} \approx 3 \times i_{s3} \approx 3 \times i_s \quad (5.1)$$

Désormais, nous utiliserons la variable i_s pour désigner le courant dans un bras de hacheur. La tension moyenne V_H , à l'échelle temporelle de la période de découpage, s'écrit :

$$V_H = \alpha_{bt} \cdot V_{BUS} \quad (5.2)$$

La résistance $r_{cvs,bt}$ matérialise les pertes dans le hacheur et l'inductance L admet une résistance interne r_L [41]. Du côté des batteries, la tension à vide et la résistance série du module (N_{sBT} batteries en série) valent :

$$\begin{cases} E_0 = N_{sBT} \cdot e_{bt}(q) \\ R_{BT} = N_{sBT} \cdot r_{bt} \end{cases} \quad (5.3)$$

La fonction $e_{bt}(q)$ introduite au chapitre 4 (§4.4.1, page 145) donne la tension à vide de l'élément de batterie en fonction de l'état de charge de ce dernier.

A l'échelle temporelle de la période de découpage, les tensions V_H et E_0 peuvent être considérées comme constantes. Le circuit L,R constitué de la résistance $r_{cvs,bt}$, de l'inductance de L et sa résistance interne r_L et de la résistance R_{BT} , compte tenu de la convention générateur utilisée dans ce rapport, est régi par l'équation :

$$V_H - E_0 = V_{H0} = -L \cdot \frac{di_s}{dt} - (r_{cvs,bt} + r_L) \cdot i_s - R_{BT} \cdot I_{BT} \quad (5.4)$$

En introduisant l'approximation de l'équation Eq.5.1, on obtient :

$$V_{H0} = -L \cdot \frac{di_s}{dt} - (r_{cvs,bt} + r_L) \cdot i_s - 3 \times R_{BT} \cdot i_s \quad (5.5)$$

Cette nouvelle relation correspond à la fonction de transfert suivante :

$$\frac{i_s(s)}{V_{H0}(s)} = \frac{-1}{L \cdot s + r_{cvs,bt} + r_L + 3 \times R_{BT}} \quad (5.6)$$

Par ailleurs, la tension du module de batteries s'écrit :

$$V_{BT} = E_0 - R_{BT} \cdot I_{BT} \quad (5.7)$$

La figure 5.5 montre le modèle électrique dynamique moyen d'un module de batteries. Le modèle reçoit en entrée le rapport cyclique α_{bt} et la tension V_{BUS} du bus continu et produit en sortie la tension V_{BT} , le courant I_{BT} et l'état de charge q_{BT} du module.

⁽¹⁾En pratique, en fonction de la disparité des inductances de filtrage, il existe un léger déséquilibre de courant entre les bras de hacheur. Toutefois, ce déséquilibre est assez faible (moins de 5%) pour être négligé dans ce modèle.

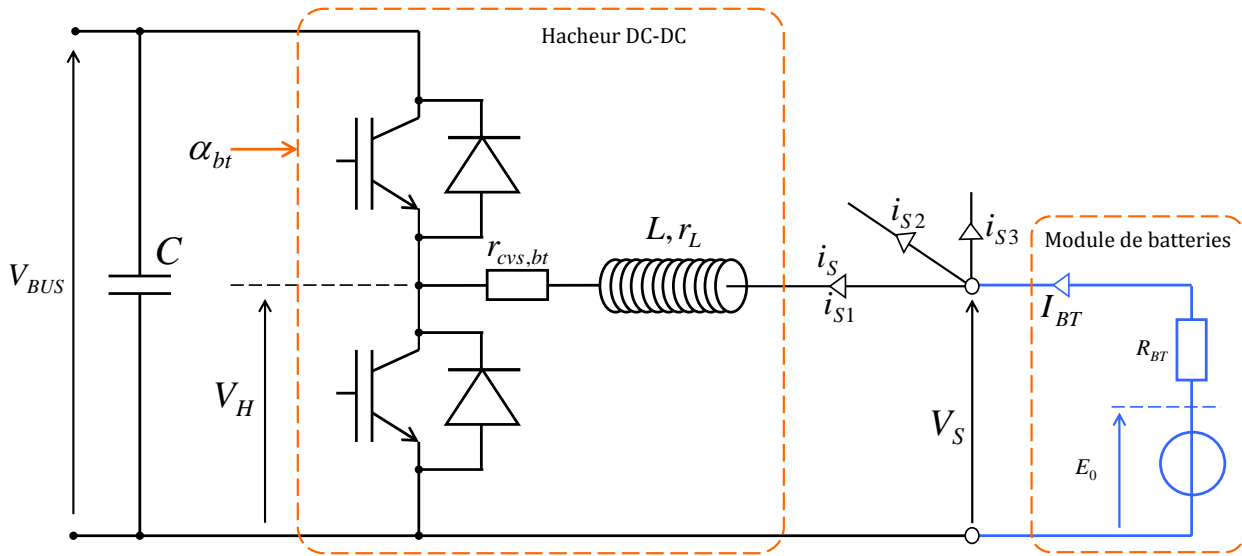


Fig. 5.4: Circuit électrique équivalent d'un module de batteries et son hacheur

Numériquement, l'inductance de lissage et sa résistance interne valent : $L = 600\mu\text{H}$ et $r = 6.5\text{m}\Omega$. Normalement, la résistance interne de la batterie évolue en fonction de l'état de décharge mais il est possible de travailler avec une valeur moyenne r_{bt} . D'après les résultats expérimentaux fournis par le fabricant, r_{bt} vaut approximativement $0.3\text{m}\Omega$ ($\pm 10\%$). Le calcul de la résistance $r_{cvs,bt}$ ne peut être qu'approximatif : nous considérons un rendement moyen du hacheur $rd_{cvs} = 94\%$ et nous nous plaçons dans le cas où I_{BT} et V_{BT} sont maxima, soit 415 A et 477 V (cf. §4.4.2, page 152). Dans ce cas, le transfert d'énergie se faisant du module de batteries vers le bus continu, nous pouvons écrire :

$$r_{cvs,bt} \cdot \left(\frac{I_{BTmax}}{3} \right)^2 = (1 - rd_{cvs}) \cdot V_{BTmax} \cdot \frac{I_{BTmax}}{3} \quad (5.8)$$

Soit :

$$r_{cvs,bt} = \frac{3 \times (1 - rd_{cvs}) \cdot V_{BTmax}}{I_{BTmax}} = \frac{3 \times (1 - 0.94) \times 477}{415} = 206\text{ m}\Omega \quad (5.9)$$

Il faut noter que la représentation des pertes (de conduction et de commutation) par une résistance $r_{cvs,bt}$ placée en sortie du bras n'est qu'une vision très approximative. Comme

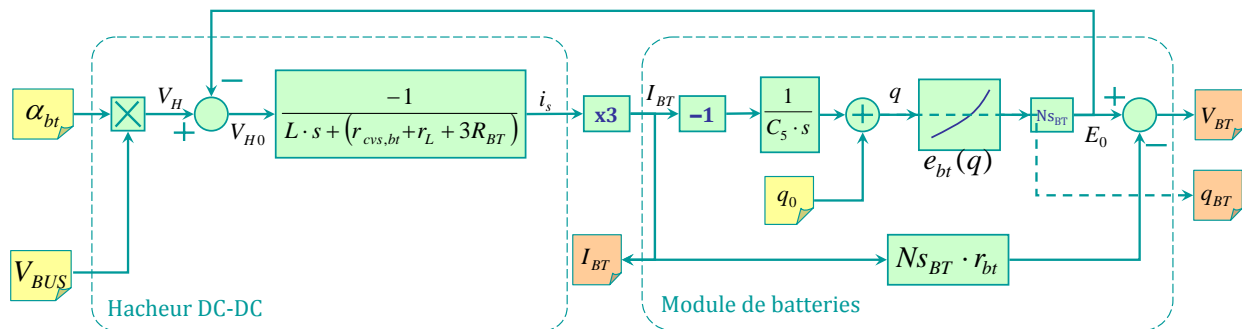


Fig. 5.5: Modèle électrique dynamique moyen d'un module de batteries et son hacheur

nous allons le voir ensuite cette résistance influe directement sur les relations de transfert (constante de temps) courant-tension. En pratique cependant, la robustesse des régulateurs de courant permet de compenser les écarts liés à cette approximation.

En résumé, les valeurs numériques relatives au modèle électrique dynamique moyen d'un module de batteries sont :

$$N_{\text{BT}} = 300; \quad R_{\text{BT}} = 300 \times 0.3 = 90 \text{ m}\Omega; \quad r_{\text{cvs, bt}} = 206 \text{ m}\Omega; \quad L = 600 \text{ }\mu\text{H}; \quad r_L = 6.5 \text{ m}\Omega \quad (5.10)$$

Remarque: Il peut paraître étrange, compte tenu de la pratique traditionnelle [41], que le modèle du hacheur intègre le paramètre R_{BT} du module de batteries. Mais, sur le plan purement électrique, il ne peut pas en être autrement : R_{BT} constitue l'impédance vue par le hacheur. Le raisonnement traditionnel qui consiste à considérer la fonction de transfert plus simple :

$$\frac{i_s(s)}{V_H - V_{\text{BT}}(s)} = \frac{-1}{L \cdot s + r_{\text{cvs, bt}} + r_L} \quad (5.11)$$

ne prend pas en compte la simultanéité des dépendances réciproques entre i_s et V_{BT} , due à la résistance série du module de batteries.

5.2.2 Module de supercondensateurs et hacheur associé

La démarche précédente est réitérée pour les modules de supercondensateurs. La figure 5.6 montre le circuit électrique équivalent d'un module de supercondensateurs et son hacheur à 3 bras entrelacés. Par analogie avec le cas des batteries, nous avons :

$$I_{\text{SC}} \approx 3 \times i_{s1} \approx 3 \times i_{s2} \approx 3 \times i_{s3} \approx 3 \times i_s \quad (5.12)$$

$$V_H = \alpha_{\text{sc}} \cdot V_{\text{BUS}} \quad (5.13)$$

$$R_{\text{SC}} = N_{\text{SC}} \cdot r_{\text{sc}} \quad (5.14)$$

La tension aux bornes de la capacité C_{SC} s'écrit :

$$V_C = V_0 - \frac{1}{C_{\text{SC}}} \int_t^0 I_{\text{SC}}(\tau) d\tau \quad (5.15)$$

A l'échelle temporelle de la période de découpage, les tensions V_H et V_C peuvent être considérées comme constantes. Le circuit L,R constitué de la résistance $r_{\text{cvs, sc}}$, de l'inductance de L et sa résistance interne r_L et de la résistance R_{SC} , compte tenu de la convention générateur utilisée dans ce rapport, est régi par l'équation :

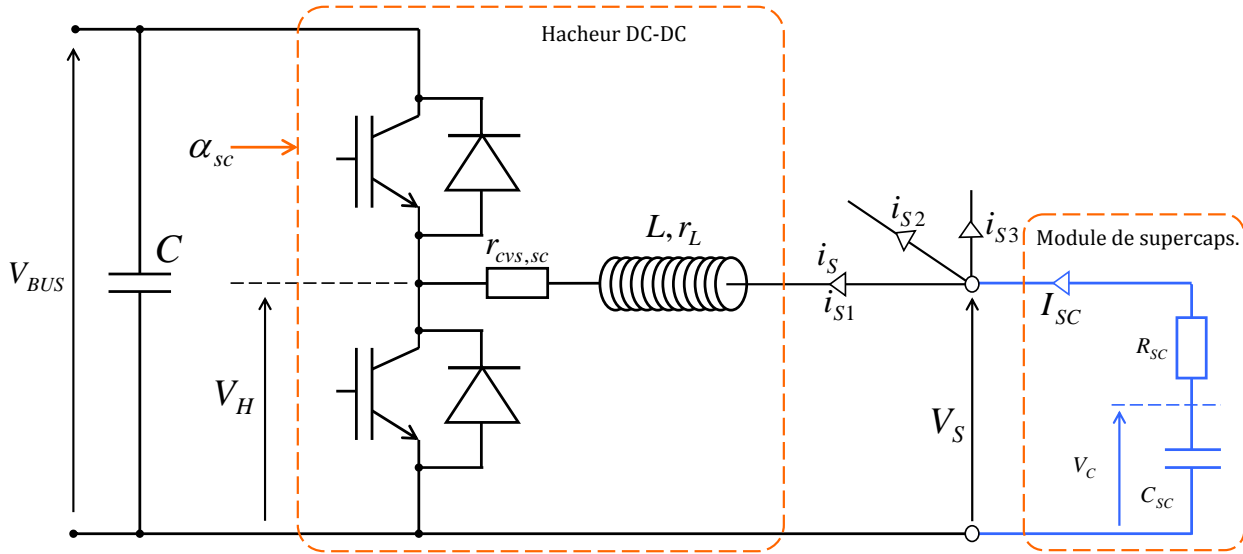


Fig. 5.6: Circuit électrique équivalent d'un module de supercondensateurs et son hacheur

$$V_H - V_C = V_{HC} = -L \cdot \frac{di_s}{dt} - (r_{cvs,sc} + r_L) \cdot i_s - R_{SC} \cdot I_{SC} \quad (5.16)$$

En introduisant l'approximation de l'équation Eq.5.12, on obtient :

$$V_{H0} = -L \cdot \frac{di_s}{dt} - (r_{cvs,sc} + r_L) \cdot i_s - 3 \times R_{SC} \cdot i_s \quad (5.17)$$

Cette nouvelle relation correspond à la fonction de transfert suivante :

$$\frac{i_s(s)}{V_{HC}(s)} = \frac{-1}{L \cdot s + r_{cvs,sc} + r_L + 3 \times R_{SC}} \quad (5.18)$$

Par ailleurs, la tension du module de supercondensateurs s'écrit :

$$V_{SC} = V_C - R_{SC} \cdot I_{SC} \quad (5.19)$$

La figure 5.7 montre le modèle électrique dynamique moyen d'un module de supercondensateurs. Le modèle reçoit en entrée le rapport cyclique α_{sc} et la tension V_{BUS} du bus continu et produit en sortie la tension V_{SC} , le courant I_{SC} et l'état de charge q_{SC} du module. La variable V_R (rated voltage) est la tension nominale du supercondensateur.

Numériquement, r_{sc} vaut $350 \mu\Omega$, $r_{cvs,sc}$ s'écrit, approximativement, de la façon suivante :

$$r_{cvs,sc} \cdot \left(\frac{I_{SCmax}}{3} \right)^2 = (1 - rd_{cvs}) \cdot V_{SCmax} \cdot \frac{I_{SCmax}}{3} \quad (5.20)$$

Soit, avec les valeurs établies à la section 4.4.2 (page 152) :

$$r_{cvs,sc} = \frac{3 \times (1 - rd_{cvs}) \cdot V_{SCmax}}{I_{SCmax}} = \frac{3 \times (1 - 0.94) \times 502}{173} = 522 \text{ m}\Omega \quad (5.21)$$

En résumé, les valeurs numériques relatives au modèle électrique dynamique moyen d'un module de supercondensateurs sont :

$$N_{SC} = 200 \quad R_{SC} = 200 \times 0.35 = 70 \text{ m}\Omega \quad r_{cvs,sc} = 522 \text{ m}\Omega \quad V_R = 2.5 \text{ V} \quad C_{SC} = 5000/200 = 50 \text{ F} \quad (5.22)$$

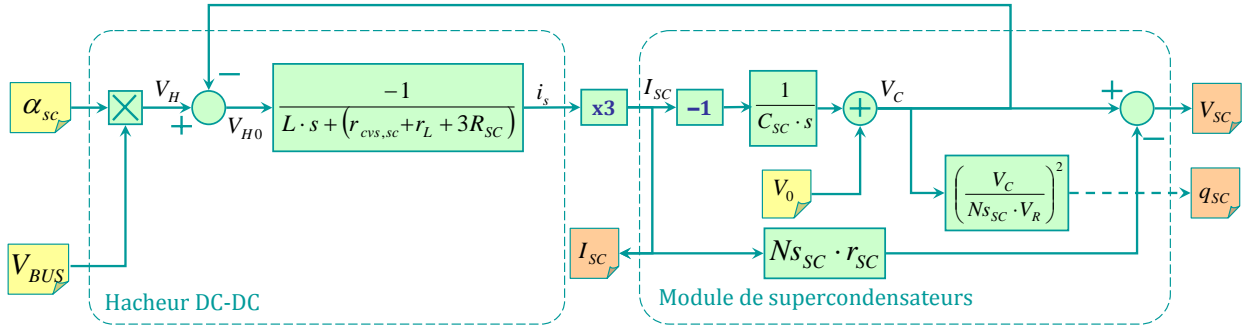


Fig. 5.7: Modèle électrique dynamique moyen d'un module de batteries et son hacheur

5.2.3 Conclusion

Dans cette section, nous avons présenté les modèles électriques dynamiques moyens des modules de batteries et de supercondensateurs. Dans le cadre de ce projet, nous avons pas élaboré le modèle électrique dynamique moyen du groupe Diesel. Néanmoins, pour procéder à des simulations du système complet et garder une compatibilité des différents blocs, nous n'avons élaboré un modèle dynamique "grossier" du groupe Diesel consistant en un simple système de premier ordre pour traduire la dynamique de réponse du sous-système groupe Diesel.

5.3 Topologie électrique et contrôle-commande de LHyDIE

Nous présentons dans cette section la topologie électrique et le contrôle-commande du démonstrateur LHyDIE. A partir de l'architecture globale, nous présentons l'attribution des fonctions de "source de courant" ou de "source de tension" aux modules, puis nous présentons l'étude de la structure avec le calcul détaillé des paramètres du contrôle-commande.

5.3.1 Topologie électrique

La topologie électrique retenue pour LHyDIE est présentée à la figure 5.8. Pour éviter de surcharger la figure, nous n'avons représenté qu'un seul des 8 modules de supercondensateurs et qu'un seul des 4 modules de batteries. Dans cette architecture, chacune des sources peut être pilotée en "source de courant" ou en "source de tension". A tout instant, il ne doit y avoir qu'une seule des sources qui soit pilotée en tension, les autres sont des "source de courant". C'est le bloc de gestion qui assure la cohérence du contrôle-commande en désignant "source de tension" et en fixant la consigne de courant aux autres sources. En cas de défaillance sur le bloc "source de tension", le bloc bascule cette fonction vers une autre source. Notons que, comme la tension de bus est contrôlée (régulée), la charge (traction + auxiliaires) se comporte en "source de courant".

L'architecture de la figure 5.8 montre trois types d'éléments : les modules physiques (groupe Diesel, modules de batteries et de supercondensateurs), les blocs de commande rapprochée et la gestion énergétique en temps réel. Nous n'aborderons pas dans ce rapport

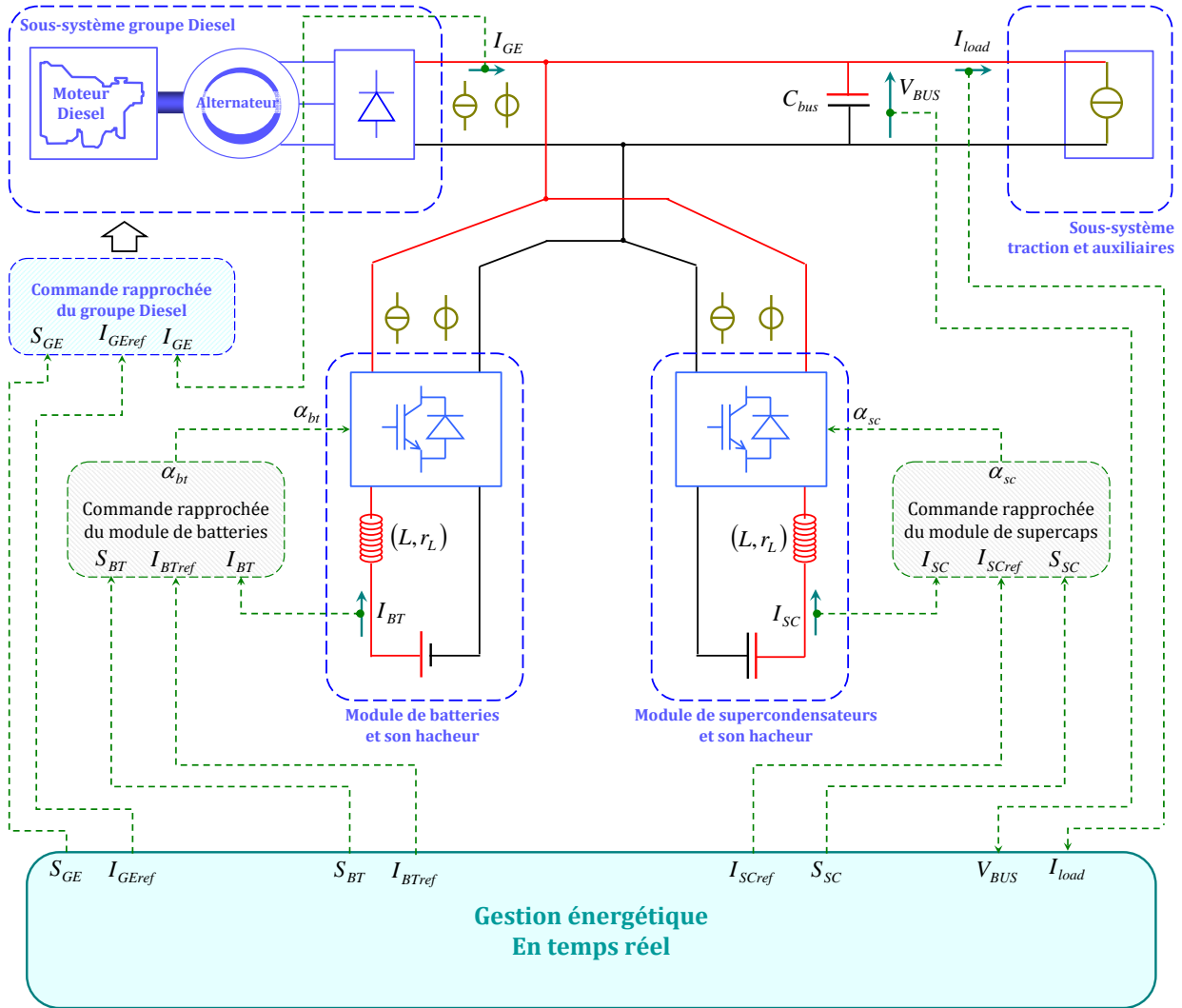


Fig. 5.8: Topologie électrique et fonction des modules du démonstrateur LHyDIE

la commande rapprochée du groupe Diesel. Retenons pour la suite que le groupe Diesel peut être piloté en "source de tension" ou en "source de courant" comme les autres modules⁽¹⁾.

La gestion énergétique en temps réel contrôle les modules de batteries (respectivement les modules de supercondensateurs) à travers les variables S_{BT} (respectivement S_{SC}) qui fixent le mode de fonction des modules et I_{BTref} (respectivement I_{SCref}) consignes de courant. Nous abordons dans les sous-sections suivantes la structure des blocs de commande rapprochée.

⁽¹⁾En fait la commande rapprochée est très complexe, car en plus des fonctions de "source de tension" ou de "source de courant", le groupe est en plus piloté à régime variable. De plus, le développement de la fonction "source de courant" représente une telle surcharge par rapport au calendrier du projet PLATHEE que la SNCF envisage de se limiter à la seule fonction de "source de tension" sur le groupe Diesel. Ainsi tant que le groupe fonctionne il est choisi par défaut pour assurer le contrôle de la tension du bus. Quand le groupe est en arrêt, la fonction de "source de tension" revient prioritairement aux modules de supercondensateurs.

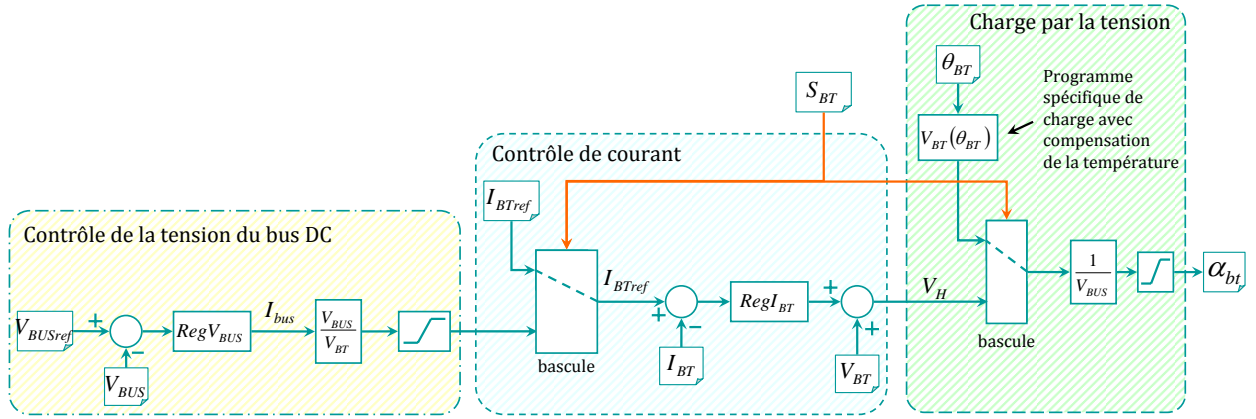


Fig. 5.9: Commande rapprochée d'un module de batteries

5.3.2 Commande rapprochée des modules de stockage

La commande rapprochée des modules de batteries et celle des modules de supercondensateurs sont semblables, à la différence près que les batteries admettent une procédure de "fin de charge" où ni la régulation de courant, ni la régulation de la tension du bus continu ne sont activées. Nous allons commencer par la commande la plus complexe :

◆ Commande rapprochée d'un module de batteries

La figure 5.9 montre le schéma synoptique de la commande rapprochée d'un module de batteries. Il y a trois étages assurant des fonctions différentes.

- L'étage de contrôle de la tension du bus DC compare la tension du bus V_{BUS} à la référence de tension V_{BUSref} et en déduit, à travers un régulateur de tension, le courant I_{bus} à injecter sur le bus pour assurer sa régulation et sa stabilisation à sa valeur de référence. Notons que, le courant I_{bus} étant un courant côté "Bus", celui-ci doit être transformé en courant "batterie". Le courant "batterie" résultant de la transformation est communiqué à l'étage de contrôle de courant. Notons que l'étage de contrôle de la tension du bus est toujours en cascade avec l'étage de contrôle de courant.
- L'étage de contrôle de courant prend sa consigne soit directement du bloc de gestion, soit de l'étage de contrôle de la tension du bus. La consigne de courant est ensuite comparée au courant mesuré. Puis, à travers un régulateur de courant et une compensation, le rapport cyclique α_{BUS} est déterminé. Notons que l'étage de contrôle de courant peut fonctionner isolément des autres étages.
- Le dernier étage est une procédure spécifique de "fin de charge" qui permet de terminer la charge du module de batteries en imposant une tension de sortie qui suit une loi de compensation de la température. Les courbes de compensation sont données à l'annexe C.2. Notons que cet étage exclut les deux autres.

Le choix de la fonction que doit assurer un module est imposée à travers la variable S_{BT} contrôlée par le bloc de gestion. La variable S_{BT} admet trois valeurs possibles : 0 pour le mode "régulation de tension", 1 pour le mode "régulation de courant" et 2 pour le mode "charge en floating".

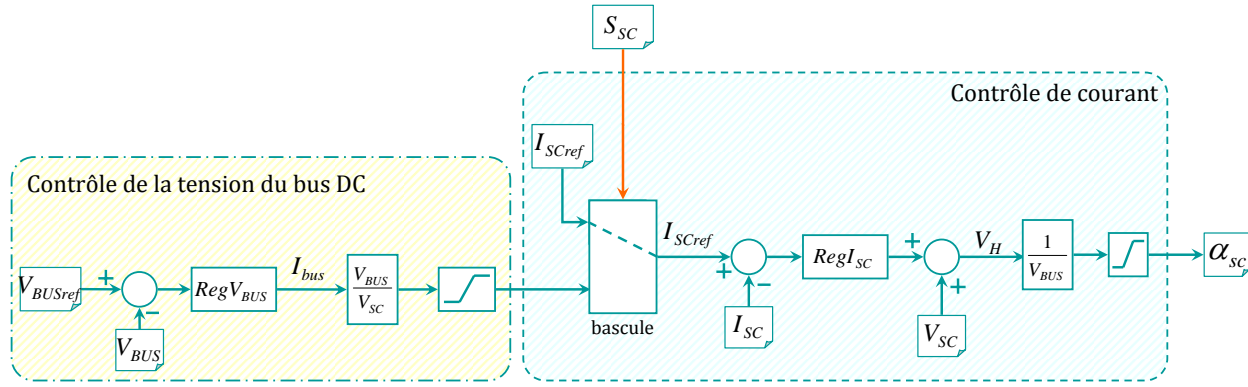


Fig. 5.10: Commande rapprochée d'un module de supercondensateurs

◆ Commande rapprochée d'un module de supercondensateurs

La commande rapprochée d'un module de supercondensateurs est beaucoup plus simple que celle d'un module de batteries. La figure 5.10 montre le schéma synoptique de la commande rapprochée d'un module de supercondensateurs qui n'a plus que les deux premiers étages. La variable S_{SC} admet deux valeurs possibles : 0 pour le mode "régulation de tension" et 1 pour le mode "régulation de courant".

5.3.3 Régulation de courant

La figure 5.11 montre le modèle du hacheur associé aux modules de batteries, piloté par un régulateur de courant. Le régulateur de courant calcule la tension V_L aux bornes de la résistance $r_{cvs, bt}$ et l'inductance (L, r_L). Un système de compensation permet de compléter la tension V_L par la mesure de la tension V_{BT} . La somme V_H obtenue est divisée par la tension du bus pour déduire le rapport cyclique α_{bt} . La variable α_{bt} est écrêtée entre les limites 0.07 et 0.93 pour garder la contrôlabilité du système et respecter les temps morts entre commutations d'IGBTs. Ensuite, vient le modèle du hacheur que nous avons présenté à la section 5.2.1. Le régulateur de courant est de type PI de la forme :

$$\text{Reg}I_{BT}(s) = k_{pbt} + \frac{k_{ibt}}{s} \quad (5.23)$$

La synthèse de régulateur de courant des modules de batteries et de celui des modules de supercondensateurs est traitée à l'annexe E.1.

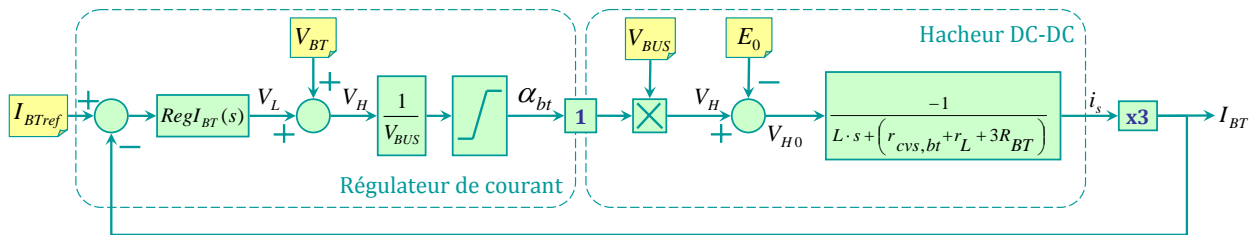


Fig. 5.11: Modèle du hacheur et régulateur de courant associé (1)

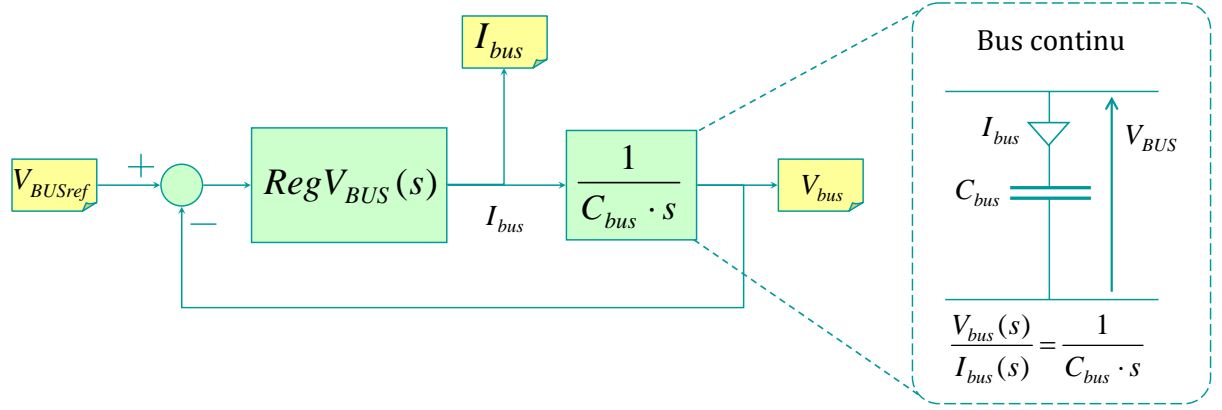


Fig. 5.12: Modèle du bus et le régulateur de tension associé

5.3.4 Régulation de la tension du bus continu

Soit C_{bus} la capacité du bus, C_{bus} est la somme des capacités de filtrage des convertisseurs montés sur le bus. Chaque module de stockage admet une capacité de $3 \times 600 \mu F$, ce qui fait un total de 21.6 mF . A cette capacité, il faut ajouter les capacités des convertisseurs de traction ($2 \times 6 \times 600 \mu F$) et des auxiliaires ($2 \times 3 \times 600 \mu F$). Au total, la capacité du bus de tension s'élève à environ :

$$C_{bus}^{max} = 32.4 \text{ mF} \quad (5.24)$$

Par ailleurs, en prenant en compte la situation extrême où la locomotive perd la moitié du dispositif de stockage, soit un déficit de $36 \times 600 \mu F$, on a :

$$C_{bus}^{min} = 21.6 \text{ mF} \quad (5.25)$$

La capacité du bus est donc un paramètre variable, évoluant entre 21.6 mF et 32.4 mF . La figure 5.12 montre le modèle du bus de tension et le régulateur associé. Le régulateur de tension est de type PI de la forme :

$$RegV_{BUS}(s) = k_{pbus} + \frac{k_{ibus}}{s} \quad (5.26)$$

La synthèse de régulateur de tension est traitée à l'annexe E.2.

5.3.5 Compensation des pertes dans les supercondensateurs

Comme nous l'avons rappelé à la section 5.1.3, les pertes dans les supercondensateurs, lorsqu'elles ne sont pas compensées, créent une dérive lente de l'état de charge des supercondensateurs et, au bout d'un certain temps, les déchargent complètement. Au lieu d'estimer ces pertes et de les compenser, nous allons corriger la dérive lente d'énergie qu'elles provoquent. Pour cela, il suffit d'assurer que la tension des supercondensateurs revienne régulièrement à la pleine charge sur la durée totale de la mission. Il est important de noter que nous ne contrôlons pas directement la tension des supercondensateurs car cela reviendrait à interférer avec leur mission normale : on ne peut pas contrôler simultanément

le courant et la tension des supercondensateurs.

Comme le montre la figure 5.13, la compensation des pertes dans les supercondensateurs est une boucle supplémentaire qui se superpose à la boucle de régulation de courant, sans que l'une n'interfère avec l'autre. En effet, la dynamique de la boucle de compensation est choisie de sorte qu'elle soit très lente par rapport à la boucle de régulation de courant. Ce principe de compensation a prouvé son efficacité et sa robustesse dans de nombreux travaux dont la thèse d'Olivier Langlois [41]. La boucle de compensation fonctionne d'une façon assez simple : la tension du module de supercondensateurs est mesurée puis comparée à une référence V_{SCref} . Puis, à travers un régulateur de tension de faible dynamique $RegV_{SC}$, le courant I_{sup} nécessaire pour compenser la dérive de la tension est calculé. Ce courant est directement additionné (convention générateur) à la mission du module pour être pris en compte. Le filtre placé en aval du régulateur $RegV_{SC}$, comme nous allons le voir plus bas, permet d'éliminer le zéro du système régulé. Notons par ailleurs que la présence du filtre permet d'améliorer les performances du régulateur [41].

Le calcul du régulateur $RegV_{SC}$ est facilité par l'indépendance totale, sur le plan de la dynamique, entre la boucle de courant et celle de compensation. En effet, pour calculer $RegV_{SC}$, nous pouvons ignorer sans conséquence la boucle de courant. Ainsi, nous obtenons le modèle simplifié de la figure 5.14a. En choisissant le filtre de sorte que :

$$\tau_f = \tau_{sc} = R_{SC} \cdot C_{SC} \quad (5.27)$$

nous obtenons un système (voir figure 5.14b) dont la fonction de transfert en boucle fermée est :

$$\frac{V_{SC}(s)}{V_{SCref}(s)} = \frac{1 + \frac{k_{pvsc}}{k_{ivsc}} \cdot s}{1 + \frac{k_{pvsc}}{k_{ivsc}} \cdot s - \frac{C_{SC}}{k_{ivsc}} \cdot s^2} \quad (5.28)$$

Par identification du dénominateur avec la fonction type du second ordre, on obtient :

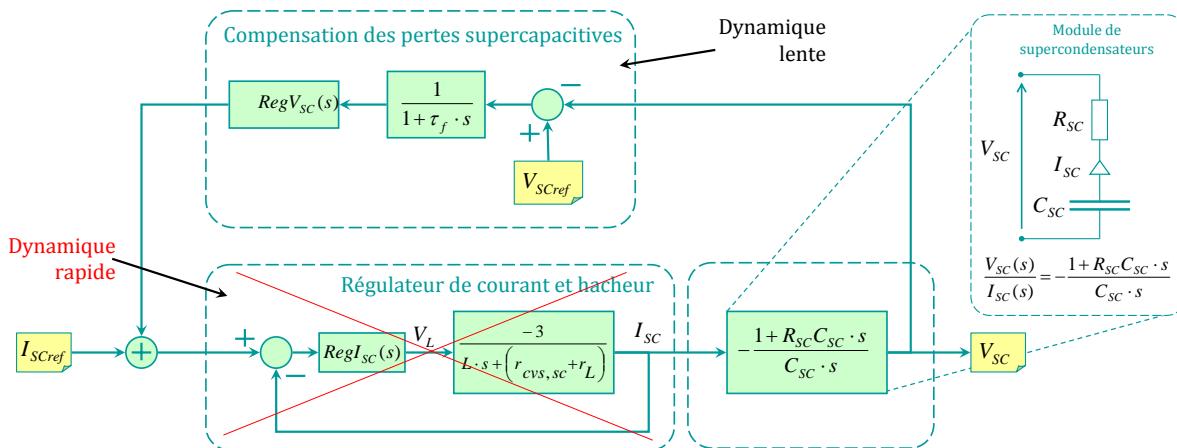


Fig. 5.13: Compensation des pertes dans les supercondensateurs

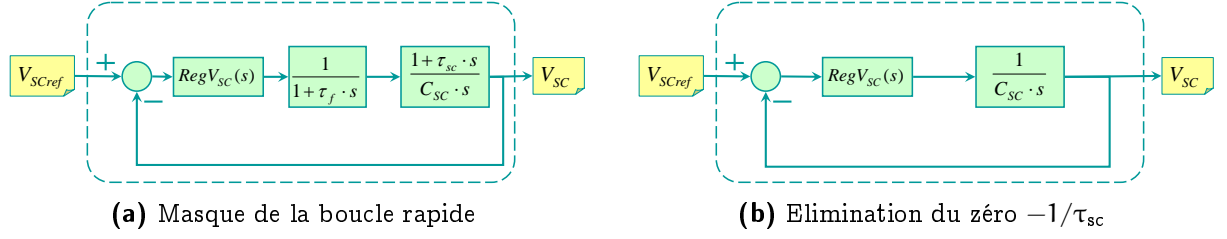


Fig. 5.14: Simplification de la boucle de compensation

$$\begin{cases} k_{ivsc} = -C_{SC} \cdot \omega_n^2 \\ k_{pvsc} = -2 \times \xi \cdot C_{SC} \cdot \omega_n \end{cases} \quad (5.29)$$

5.3.6 Choix des bandes passantes

Le premier paramètre qui conditionne le choix des bandes passantes est la fréquence de découpage (F_{dec}). En effet, la période de découpage T_{dec} constitue l'horizon temporel minimum pendant lequel la variation des paramètres de contrôle les plus rapides – les rapports cycliques α_{bt} et α_{sc} – n'a aucun effet. De fait, aussi rapides que peuvent être nos régulateurs, leur bande passante ne peut dépasser F_{dec} . Traditionnellement, on met un écart d'une décade au moins entre la fréquence de découpage et la bande passante la plus large du système. Sachant que la fréquence de découpage est fixée à 2 kHz, nous avons donc choisi la limite de 200 Hz pour la bande passante la plus large.

L'effet de "cascade" entre les régulateurs de courant $RegI_{SC}$ et $RegI_{BT}$ et le régulateur de tension $RegV_{BUS}$ impose que les premiers soient plus rapides que le dernier. Par ailleurs, nous avons fait l'hypothèse que, comparativement aux régulateurs de courant, le régulateur de tension $RegV_{SC}$ assurant la compensation des pertes dans les supercondensateurs, doit être très lent pour ne pas interférer sur la mission normale des supercondensateurs. De tout ce qui précède, nous déduisons que les régulateurs les plus rapides sont $RegI_{SC}$ et $RegI_{BT}$, ensuite vient le régulateur de tension $RegV_{BUS}$, puis le régulateur de tension $RegV_{SC}$.

Nous avons fixé la bande passante pour les régulateurs de courant $RegI_{SC}$ et $RegI_{BT}$ à 200 Hz, puis celle du régulateur de tension $RegV_{BUS}$ à 20 Hz (une décade plus bas). Quant à la compensation des pertes dans les supercondensateurs, le régulateur $RegV_{SC}$ qui assure cette fonction admet un horizon temporel bien plus large que les autres régulateur et même plus large que la "dynamique des trains"⁽¹⁾. Compte tenu de la lente dynamique de la dérive de l'état de charge moyen, nous avons fixé la bande passante de $RegV_{SC}$ à 0.5 mHz.

⁽¹⁾Nous entendons par "dynamique des trains" la période d'échantillonnage des missions de puissance utilisées dans cette mémoire. Elle est d'environ 1 s.

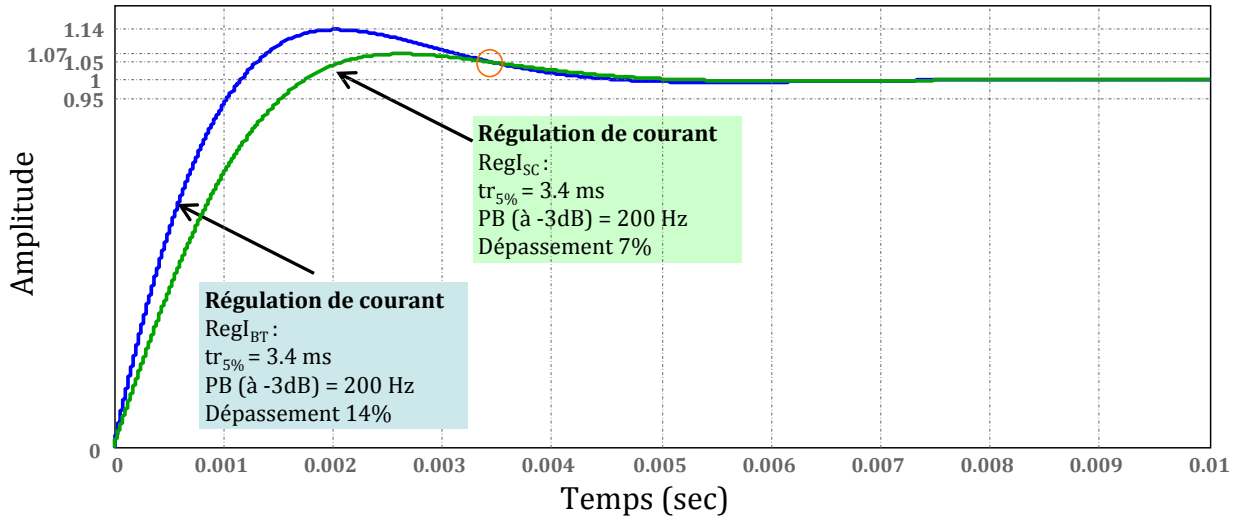


Fig. 5.15: Réponses indicielles de RegI_{SC} et de RegI_{BT}

La figure 5.15 montre les réponses indicielles des boucles de régulation de courant RegI_{SC} et RegI_{BT} : avec la bande passante fixée à 200 Hz, nous obtenons un temps de réponse $\text{tr}_{5\%}$ égal à 3.4 ms. RegI_{BT} présente un dépassement de 14% alors que le dépassement de RegI_{SC} n'est que de 7%. Cette différence n'est pas liée à la nature des sources, mais plutôt au fait que la régulation de courant est très sensible à la résistance r_{cvs} matérialisant les pertes joules dans le hacheur : $r_{\text{cvs,bt}}$ vaut 206 m Ω tandis que $r_{\text{cvs,sc}}$ vaut 522 m Ω ⁽¹⁾.

Remarque: Nous avons déjà signalé que la représentation des pertes par une résistance $r_{\text{cvs,bt}}$ ($r_{\text{cvs,sc}}$) est une approximation. Nous constatons ici que cette résistance agit de façon prépondérante sur les bandes passantes. En pratique, les régulateurs de courant sont assez robustes pour compenser les écarts de modélisation. Cependant, il serait nécessaire de réajuster ces paramètres pendant de la phase de réalisation.

La figure 5.16 montre la réponse indicielle de la boucle de régulation de la tension du bus continu RegV_{BUS} : avec la bande passante fixée à 20 Hz, nous obtenons un temps de réponse $\text{tr}_{5\%}$ égal à 33 ms et un dépassement de 14%. Comme le montre la figure 5.17, avec la bande passante fixée à 1 mHz, nous obtenons un temps de réponse $\text{tr}_{5\%}$ égal à 10 min et un dépassement de 12%.

Pour conclure sur le choix des bandes passantes, considérons la cartographie de la figure 5.18 qui présente les bandes passantes, les temps de réponse et les dynamiques caractéristiques de la locomotive hybride LHyDIE. Le bus CAN (Controller Area Network) assure la communication entre le bloc de gestion et les commandes rapprochées. La période d'échantillonnage du CAN est choisie de façon à être 10 fois plus petite que la dynamique des trains. Comme on pouvait s'y attendre, le filtrage des missions, lié à l'attribution de la mission des supercondensateurs, est beaucoup plus lent que la dynamique des trains. La vitesse de transmission du bus CAN fait la séparation entre les opérations lentes assurées par le calculateur central et les opérations rapides assurées par les commandes rapprochées.

⁽¹⁾Plus la résistance est élevée, moins il y a de dépassement.

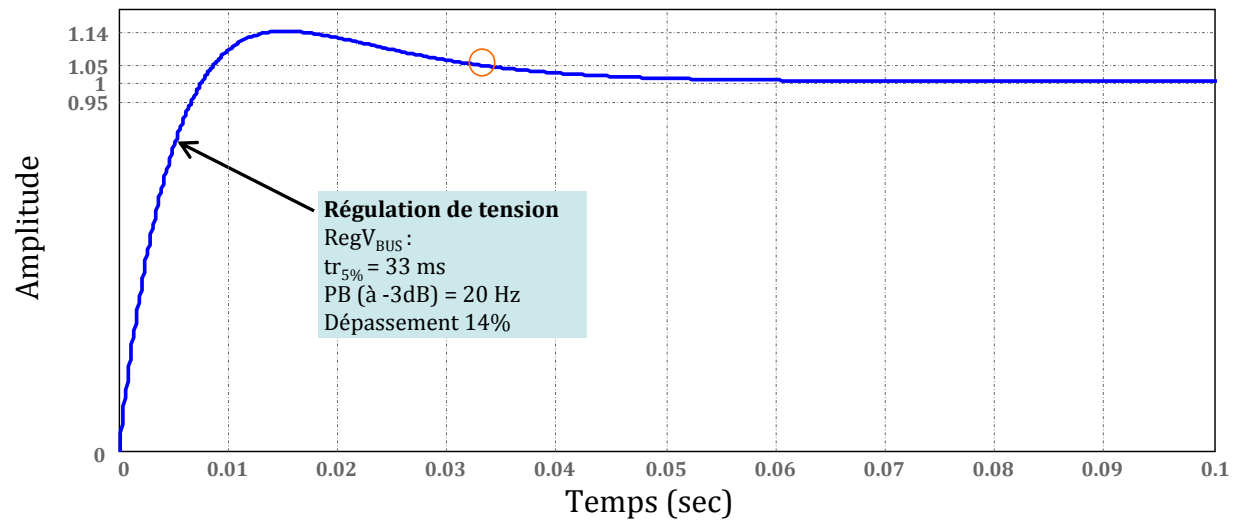
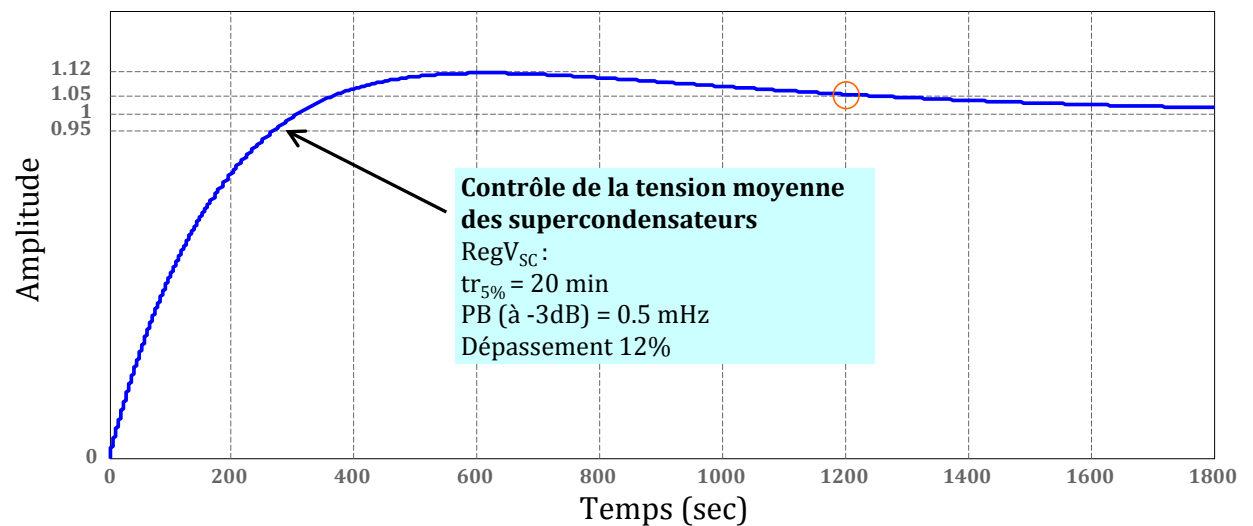
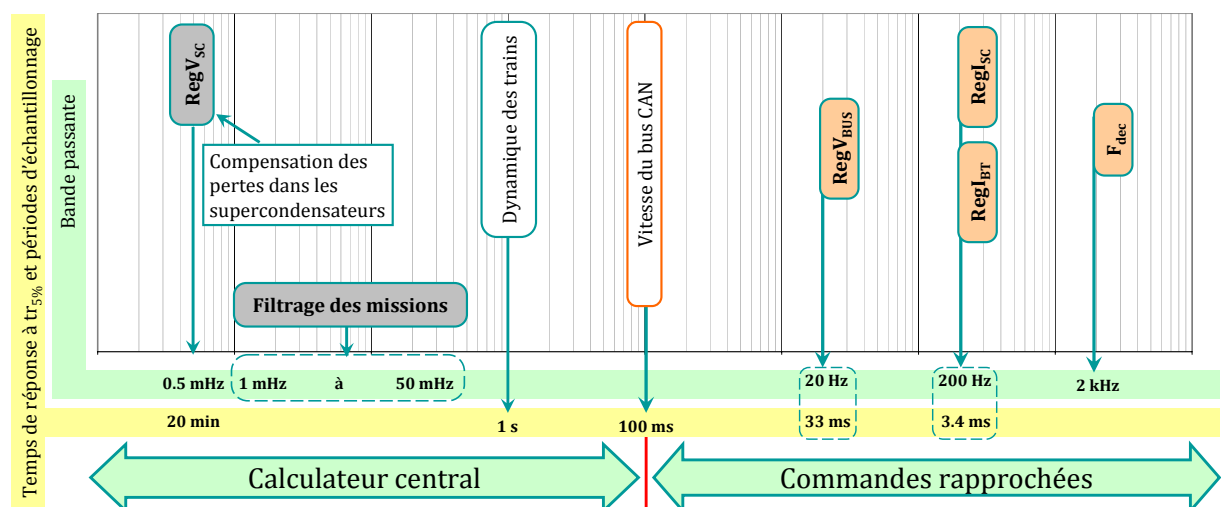
Fig. 5.16: Réponse indicielle de $RegV_{BUS}$ Fig. 5.17: Réponse indicielle de $RegV_{SC}$ 

Fig. 5.18: Cartographie des bandes passantes, des temps de réponse et des dynamiques

5.4 Gestion énergétique en temps réel

Même si dans son principe de base la gestion énergétique est assez simple, son développement en temps réel a été une phase très laborieuse. Même si le développement du code de gestion compte pour une grande partie dans ce travail, nous ne rentrerons dans le détail de la complexité informatique de ce développement.

Dans cette section, nous présentons les points essentiels de la gestion en temps réel, à savoir : l'auto-adaptation de la fréquence de filtrage des missions et la gestion du groupe Diesel et des batteries.

5.4.1 Schéma fonctionnel simplifié de la gestion en temps réel

La figure 5.19 montre le schéma fonctionnel simplifié de la gestion énergétique en temps réel. Trois processus fonctionnels interviennent dans la gestion en temps réel :

- Le processus d'observation admet deux fonctions. La première évalue, sur une durée donnée, la profondeur de décharge maximale atteinte par les supercondensateurs, ce qui permet de déterminer ensuite si les supercondensateurs sont bien utilisés ou non, s'il faut augmenter ou diminuer leur part de mission. La seconde fonction fait l'estimation en temps réel de la sévérité de la mission, ce qui permet de décider quel profil de charge utiliser pour les batteries.
- Le processus de décision assure, sur la base des informations fournies par le processus d'observation, les fonctions d'auto-adaptation de la fréquence de filtrage de la mission et de la gestion groupe Diesel (ou gestion des batteries).
- Le processus de répartition assure le filtrage de la mission, la compensation des pertes dans les supercondensateurs et l'équilibrage des états de charge des modules de batteries.

Plutôt que de présenter, dans cet ordre, les différents processus constituant la gestion en temps réel dans les sous-sections qui suivent, nous aborderons les problématiques essentielles qui transparaissent sur ce schéma fonctionnel de la gestion énergétique en temps réel.

5.4.2 Auto-adaptation de la fréquence de filtrage

Comme nous l'avons expliqué dans la première section de ce chapitre, l'auto-adaptation de la fréquence de filtrage des missions est une nécessité pour optimiser l'utilisation des supercondensateurs, d'une part en fonction de la nature de la mission et d'autre part en cas de défaillance de modules de supercondensateurs.

Globalement, la fréquence de filtrage F_{SC} varie entre 1 mHz et 100 mHz : par exemple, avec les 8 modules de 200 supercondensateurs chacun, elle évolue, en fonction de la mission, entre 1 mHz et 10 mHz. Si le nombre de modules disponibles change, cette plage de fréquence change aussi : par exemple, avec 1 seul module de supercondensateurs, la fréquence de filtrage varie, en fonction de la mission, entre 1 mHz et 40 mHz. Les plages de variation de F_{SC} , suivant le nombre de modules de supercondensateurs disponibles, sont montrées

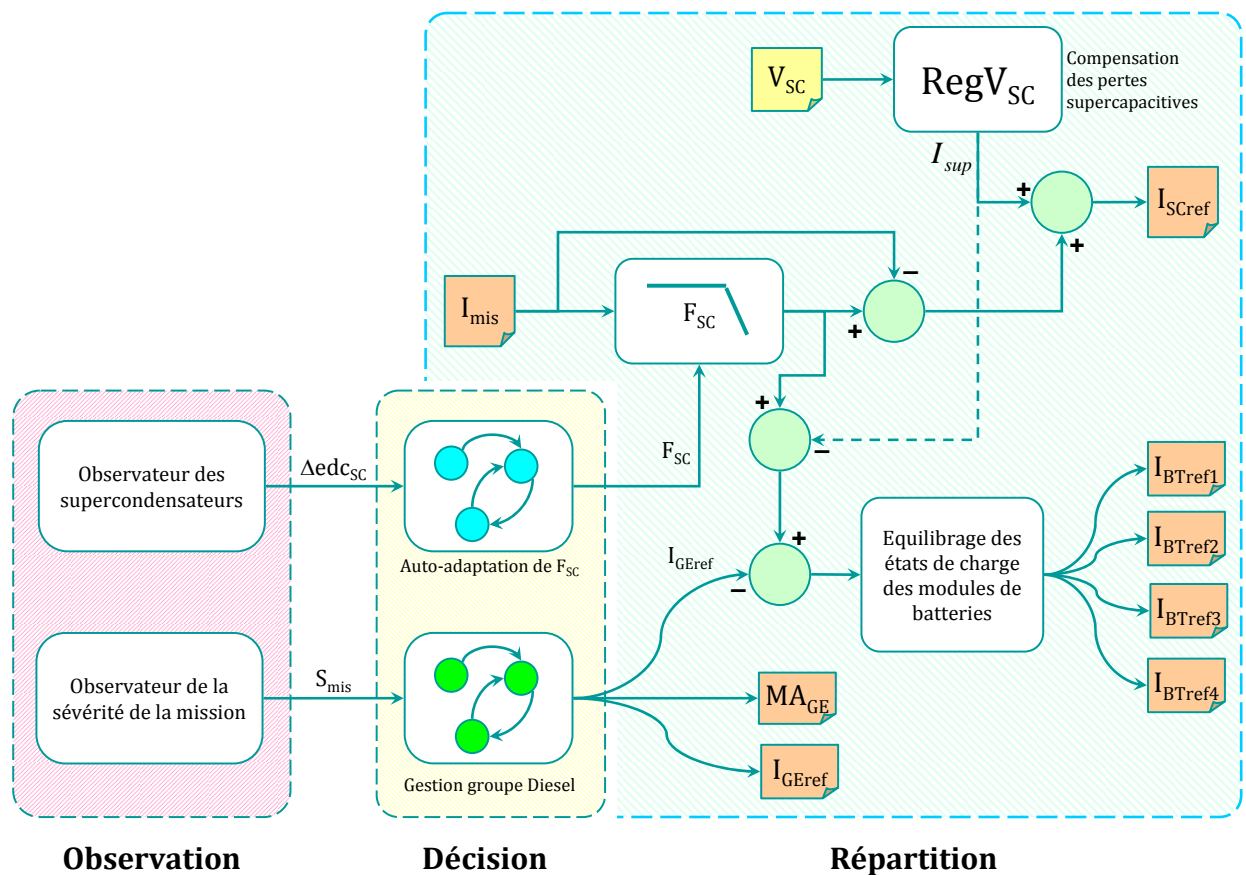


Fig. 5.19: Schéma fonctionnel simplifié de la gestion énergétique en temps réel

à la figure 5.20.

L'auto-adaptation de F_{SC} est basée sur l'observation de l'état de charge des supercondensateurs. Comme le montre la figure 5.21, une fenêtre temporelle glissante d'une largeur de 5 à 10 min scrute l'état de charge des modules de supercondensateurs. Quatre situations sont possibles :

- Lorsque la variation de l'état de charge des supercondensateurs dépasse 80%, nous parlons de sur-sollicitation ; c'est le cas de la figure 5.21a. Dans ce cas, il convient d'augmenter la fréquence de filtrage F_{SC} pour réduire la part de mission imposée aux supercondensateurs.
- Lorsque la variation de l'état de charge des supercondensateurs évolue entre 70% et 75%, nous parlons de sollicitation optimale ; c'est le cas de la figure 5.21b. Dans ce cas, la fréquence de filtrage F_{SC} n'a pas besoin d'être modifiée.
- Lorsque la variation de l'état de charge des supercondensateurs évolue entre 65% et 15%, nous parlons de sous-sollicitation ; c'est le cas de la figure 5.21c. Dans ce cas, il convient de diminuer la fréquence de filtrage F_{SC} pour augmenter la part de mission destinée aux supercondensateurs.
- Lorsque la variation de l'état de charge des supercondensateurs évolue entre 0% et 10%, nous parlons de zone de pause ; c'est le cas de la figure 5.21d. Ce cas est très subtil car il peut être pris pour un cas de sous-sollicitation, ce qui serait une erreur.

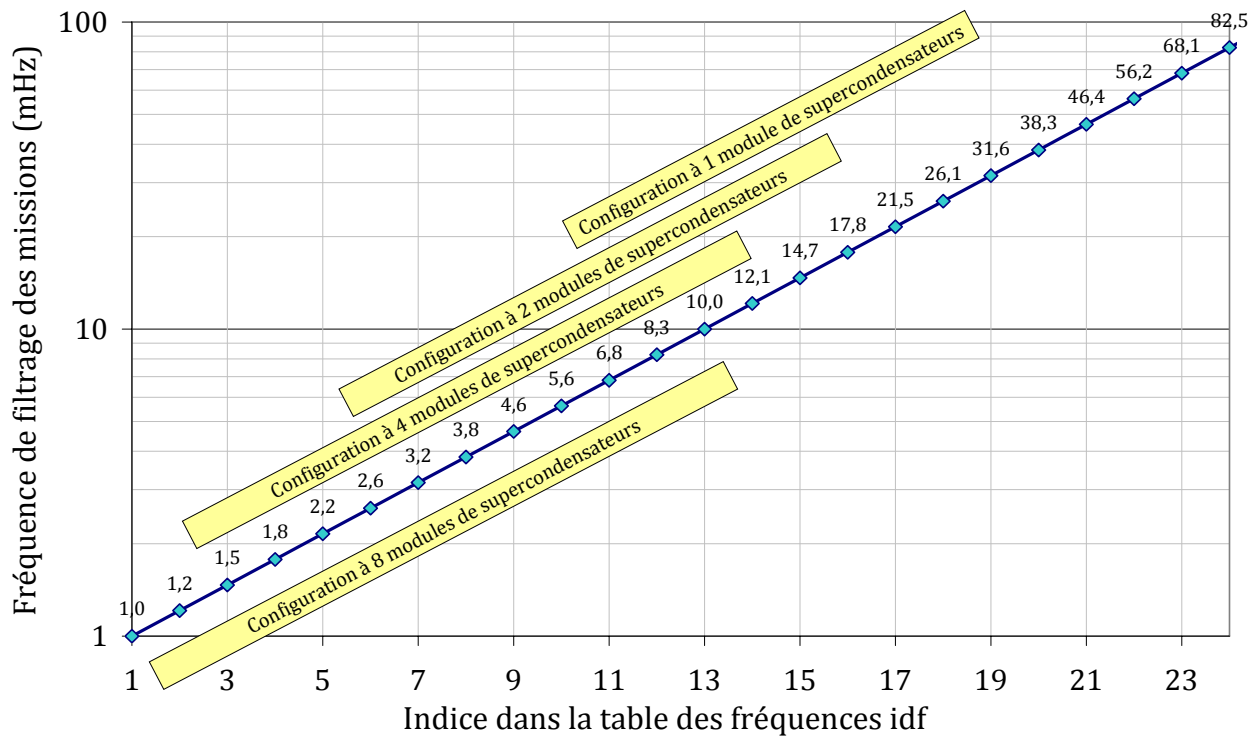
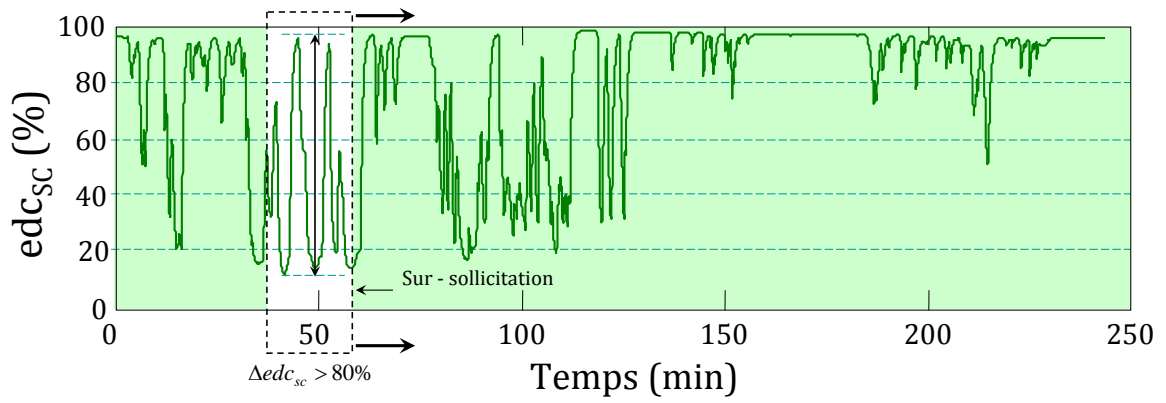


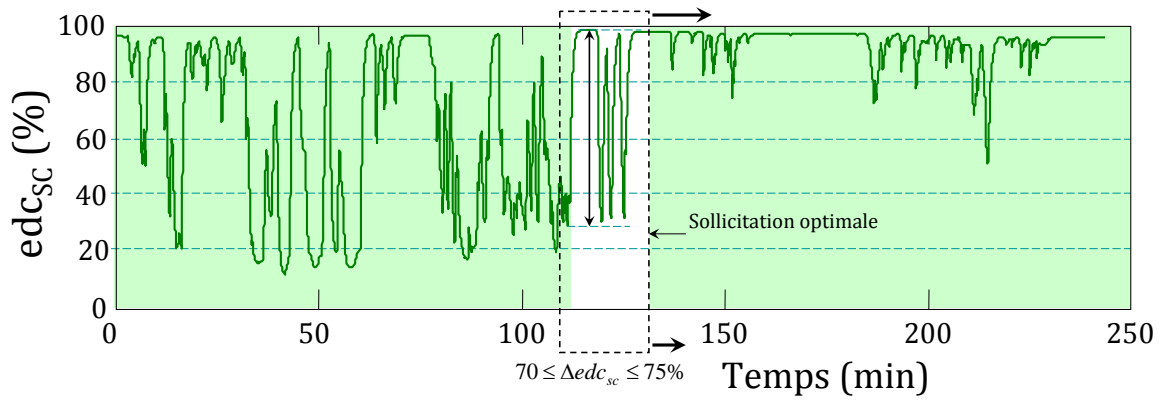
Fig. 5.20: Plage de variation de F_{SC} en fonction du nombre de modules de supercondensateurs disponibles

En effet, pendant les phases de stagnation de la mission de puissance de traction ou de demande nulle, la mission des supercondensateurs s'annule ou, en cas de régulation de la tension du bus continu par les supercondensateurs, présente de faibles variations autour de zéro. Ces phases ne sont pas des phases de sous-sollicitation mais plutôt de pause et la fréquence de filtrage F_{SC} n'a pas besoin d'être modifiée.

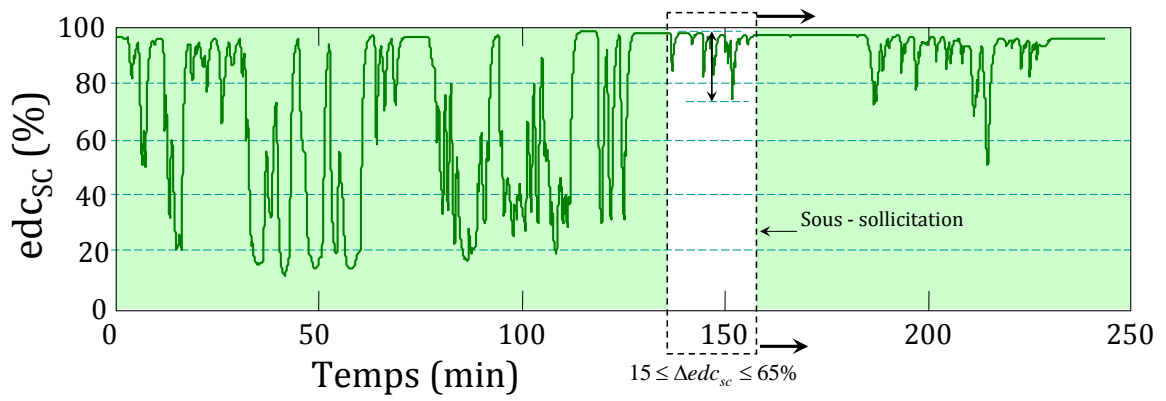
Plus concrètement, nous avons créé une table $Tab_{SC}(Idf \rightarrow F_{SC})$ de 25 valeurs de fréquences prises entre 1 mHz et 82.5 mHz. La variable Idf correspond à la position de la fréquence F_{SC} dans la table Tab_{SC} . La figure 5.22 résume plus clairement la logique d'auto-adaptation de la fréquence de filtrage F_{SC} . Les frontières entre les différentes zones sont nuancées par un hystérésis de largeur 5%.



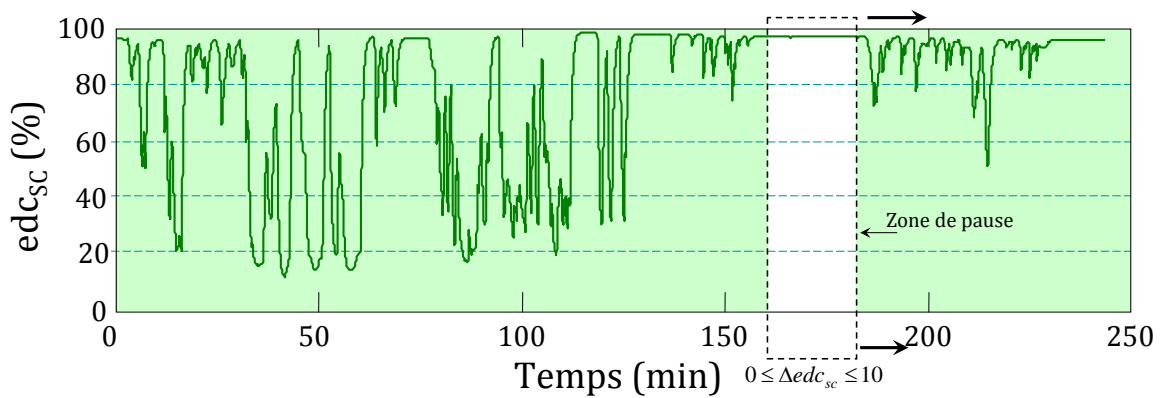
(a) Cas de sur-sollicitation



(b) Cas de sollicitation optimale



(c) Cas de sous-sollicitation



(d) Cas de pause

Fig. 5.21: Observation de l'utilisation des supercondensateurs

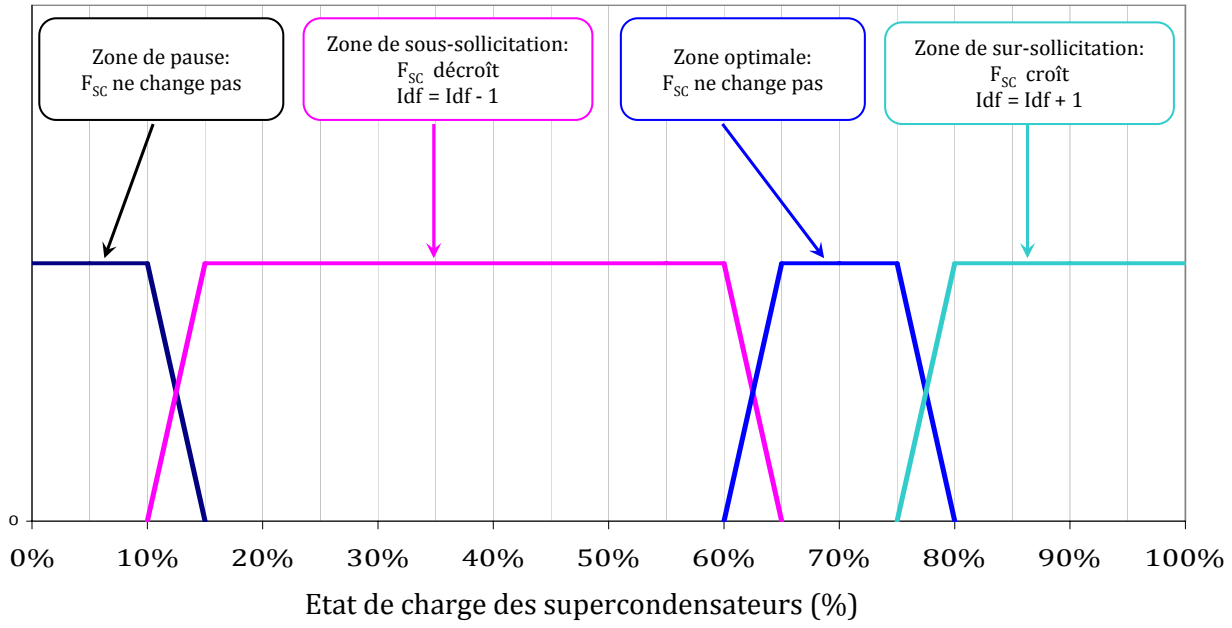


Fig. 5.22: Logique d'auto-adaptation de la fréquence de filtrage F_{sc}

5.4.3 Gestion du groupe Diesel et de la charge des batteries

Au chapitre 4, dans le modèle d'analyse en flux de puissance, la gestion du groupe Diesel se fait seulement en fonction du niveau de charge des batteries et de la valeur instantanée de la puissance consommée. Dans la gestion en temps réel, avec les nouvelles contraintes de limitation du courant de charge des batteries en fonction de leur état de charge, le besoin d'affiner le contrôle du groupe Diesel et des batteries nous a amenés à développer un indicateur de sévérité des missions qui nous permet de choisir, selon l'état du système et la mission en cours, parmi les deux profils de charge présentés à la sous-section 5.1.5 (page 162), lequel est le mieux adapté.

L'indicateur de sévérité des missions est basé sur le calcul en temps réel de la moyenne glissante $Mg(t)$, sur une durée d donnée, de la mission en cours :

$$Mg(t) = \frac{1}{d} \int_{t-d}^t P(\tau) d\tau \quad \text{et} \quad Sm(n) = \begin{cases} 1 & \text{si } Mg > 215 \text{ kW} \\ 0 & \text{si } Mg < 100 \text{ kW} \\ Sm(n-1) & \text{si } 100 \text{ kW} \leq Mg \leq 215 \text{ kW} \end{cases} \quad (5.30)$$

$P(t)$ est la puissance instantanée consommée par la mission.

Lorsque la moyenne glissante Mg est supérieure à la puissance nominale du groupe Diesel (215 kW), l'indicateur de sévérité Sm est égal à 1 : nous parlons de "phase sévère". Lorsque la moyenne glissante Mg est inférieure à 100 kW⁽¹⁾, l'indicateur de sévérité Sm est égal à 0 : nous parlons de "phase non sévère". Une logique de décision par hystérésis permet de

⁽¹⁾Cette valeur permet d'avoir un hystérésis assez large et donc une bonne stabilité de l'indicateur de sévérité.

déterminer la valeur de Sm lorsque Mg évolue entre 100 et 215 kW.

Les figures 5.23 et 5.24 montrent l'évolution de l'indicateur de sévérité respectivement pour une mission de desserte et une mission de triage. On note la présence de plusieurs "phases sévères" sur la mission de desserte alors que la mission de triage a une sévérité faible sur toute sa durée.

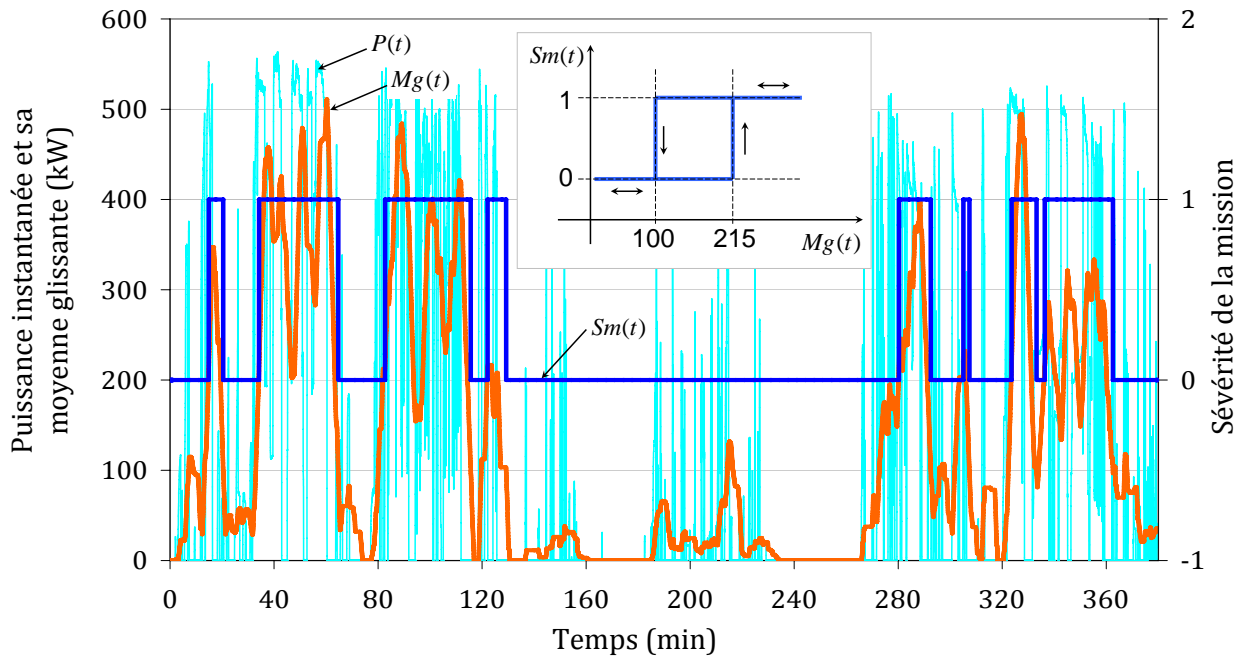


Fig. 5.23: Sévérité d'une mission de desserte

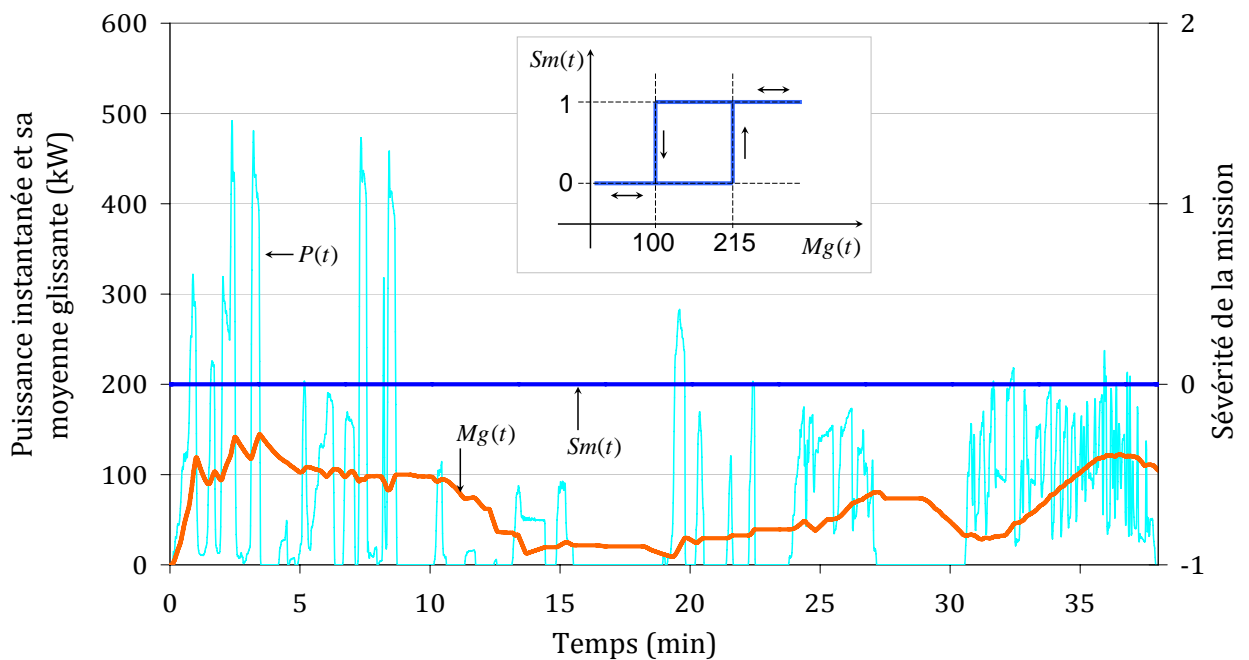


Fig. 5.24: Sévérité d'une mission de triage

L'objectif du calcul de l'indicateur de sévérité de la mission est de faciliter le choix du profil de charge adéquat pour les batteries. Lorsqu'il est nul, l'indicateur de sévérité traduit le fait que la phase de mission est "facile" et que le profil de charge normal ("Profil 1" sur la figure 5.3) est suffisant. Par contre, lorsqu'il est égal à 1, l'indicateur de sévérité traduit le fait que la mission est difficile et qu'un profil de charge renforcée ("Profil 2" sur la figure 5.3) est nécessaire pour ne pas décharger complètement les batteries en vue d'une prochaine difficulté. Cette stratégie permet de modérer la charge des batteries en fonction de la sévérité de la mission. Notons pour finir que cette stratégie de gestion des batteries a un impact direct sur le fonctionnement du groupe Diesel.

5.5 Analyses de quelques résultats de simulation

Aucun résultat de retour d'expérience n'est analysé dans ce rapport, pour la simple raison que le projet PLATHEE a accusé un léger retard par rapport au calendrier initial. A défaut de résultats expérimentaux, nous allons, dans cette section, mener une brève analyse de quelques résultats de simulation. La validation du dimensionnement de LHyDIE ainsi que l'analyse des grandeurs électriques étant déjà abordées dans les chapitres précédents, nous ne reviendrons pas sur ces aspects. Il nous est apparu particulièrement intéressant de montrer le comportement du processus d'auto-adaptation de la fréquence de filtrage des missions.

Pour illustrer l'effet du processus d'auto-adaptation de F_{SC} , nous avons choisi deux missions types : une desserte locale et un triage. Sachant qu'une journée de mission dure environ 7 heures de temps, nous avons créé artificiellement, en réitérant la même mission pour couvrir les 7 heures de la journée de mission, une journée de desserte locale et une journée de triage⁽¹⁾.

La figure 5.25 montre les résultats de simulation pour la journée de desserte locale. La première courbe représente la mission, la deuxième l'état de charge des supercondensateurs et la troisième montre l'auto-adaptation de la fréquence de filtrage. La fréquence est initialisée à la valeur référentielle de 10 mHz. En début de mission, on remarque que les supercondensateurs ne sont pas assez sollicités. La fréquence de filtrage descend alors en escalier vers des fréquences plus faibles augmentant ainsi la sollicitation des supercondensateurs, puis elle oscille autour de 6 mHz. Ces oscillations sont dues au fait que la mission de base réitérée n'est pas uniforme : elle comporte des phases de fortes sollicitations et des phases de faibles demandes. Toutefois, l'amplitude des oscillations étant bien contenue, ces dernières ne nuisent pas au système.

La figure 5.26 montre les résultats de simulation pour la journée de triage. Dans les mêmes conditions initiales que précédemment, la fréquence commence par diminuer pour optimiser l'utilisation des supercondensateurs. Puis, quand la butée énergétique de ces derniers est atteinte, la fréquence se redresse pour se stabiliser à 2.5 mHz. L'uniformité de

⁽¹⁾La concaténation de plusieurs occurrences de la même mission peut paraître simpliste mais elle traduit une situation bien possible.

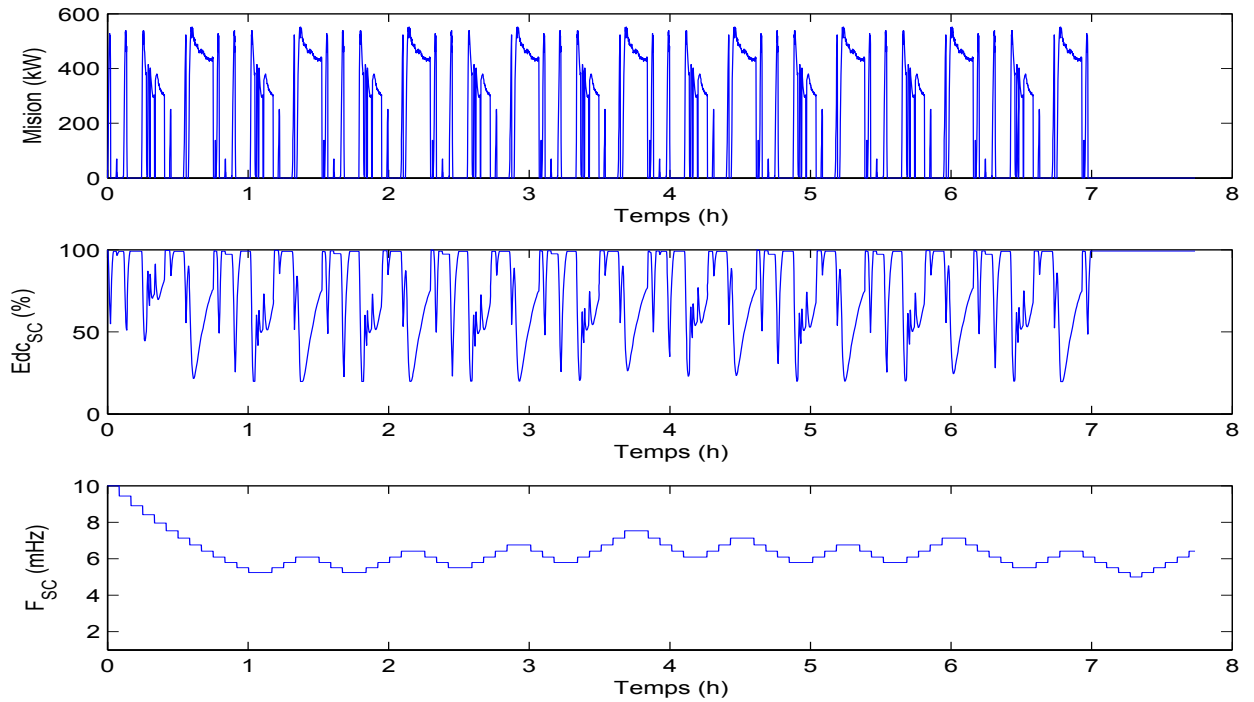


Fig. 5.25: Processus d'auto-adaptation de F_{SC} sur une journée de desserte locale

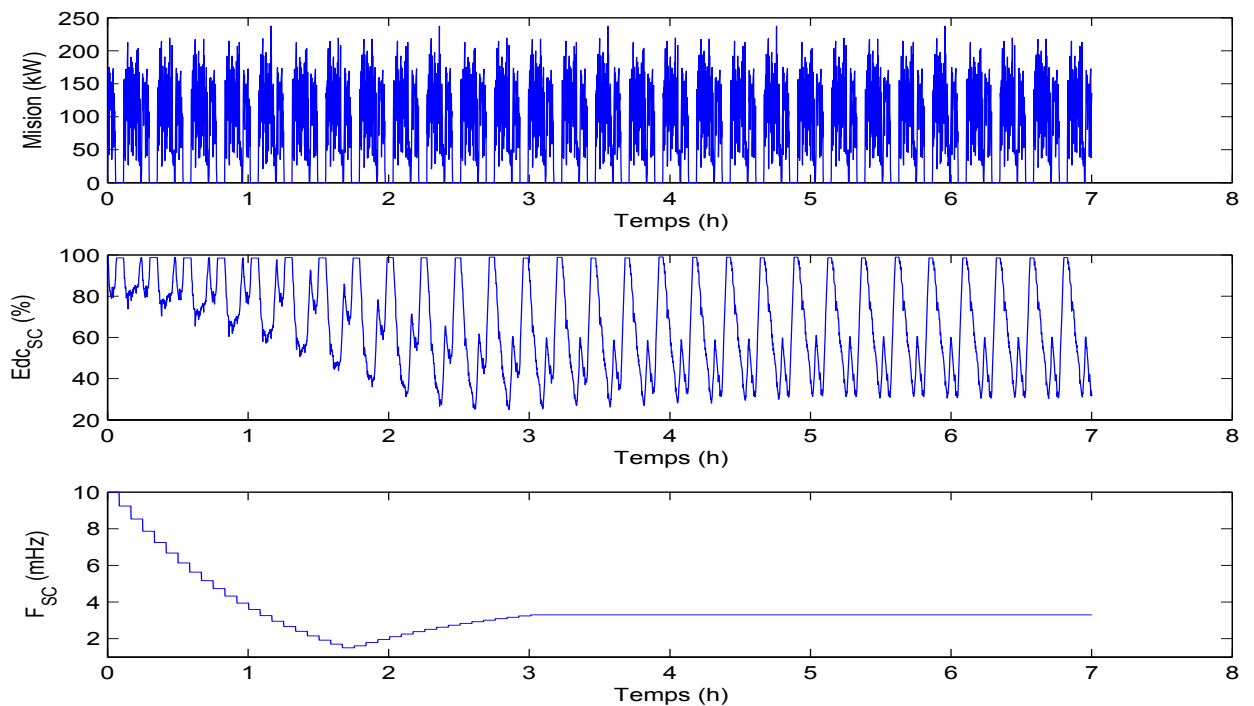


Fig. 5.26: Processus d'auto-adaptation de F_{SC} sur une journée de triage

la mission fait qu'il y a pas d'oscillations de la fréquence de filtrage, contrairement au cas de la desserte locale. Notons que les fréquences de stabilisation sont caractéristiques de la nature des missions : 6 mHz pour la desserte locale considérée et 2.5 mHz pour le triage considéré.

Le processus d'auto-adaptation de la fréquence de filtrage semble efficace dans le cas de missions uniformes et de longue durée. Mais le temps qu'il met pour approcher la bonne valeur de fréquences à 10% près varie entre 30 min et 1 h, ce qui constitue un grand handicap dans le cas de missions de courte durée ou dans le cas de missions mixtes. Une solution qui pourrait réduire le temps de réaction du processus d'auto-adaptation est le choix d'une valeur initiale plus faible, au risque d'une sur-sollicitation des supercondensateurs en début de mission.

5.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé les dernières opérations de la conception séquentielle. Nous avons notamment, à travers le modèle électrique dynamique moyen des modules de stockage, synthétisé le contrôle-commande et affiné la stratégie de gestion énergétique du démonstrateur LHyDIE. Plusieurs problématiques ont été présentées qui permettent de se rendre compte de la complexité du système que constitue la locomotive hybride. Le chapitre qui suit reprend, dans une optique d'optimisation multicritère, le problème de la conception systémique d'une locomotive hybride.

Chapitre 6

Conception simultanée par optimisation multicritère d'un train hybride

Dans les chapitres précédents, nous avons présenté une démarche de conception systémique dite "séquentielle" qui nous a permis de concevoir la locomotive hybride de démonstration LHyDIE, à partir de la spécification d'un cahier des charges intégrant les missions de puissance, les contraintes d'encombrement, de tension maximale et de limite de dégradation temporelle des missions. Le caractère séquentiel de cette démarche nous a permis d'aborder et de traiter, au fur et à mesure de la conception, différentes problématiques liées à l'hybridation ferroviaire. Nous avons abordé notamment, à travers le modèle en flux de puissance, la synthèse du dimensionnement et de la gestion énergétique d'une locomotive hybride ainsi que l'analyse du dimensionnement énergétique. Puis, à partir des modèles électriques de plus en plus détaillés, nous avons terminé la conception par le dimensionnement électrique de la locomotive et le développement des organes de commande.

Mais la démarche séquentielle pose le problème de l'optimalité du système conçu. En effet, même si les choix effectués à chaque étape de la démarche sont soumis à une réflexion d'optimisation locale, rien ne prouve, le contraire est d'ailleurs plus probable, que le système conçu soit optimal dans son ensemble. La démarche séquentielle ne permet pas d'avoir une lisibilité globale effective du système : le fait de prendre des décisions ou de faire des choix de façon isolée et séquentielle masque les couplages inter-paramétriques et l'influence de ces choix sur les finalités du système.

Dans ce chapitre, nous reprenons, dans une optique d'optimisation multicritère, le problème de conception d'une locomotive hybride à travers une démarche de conception simultanée. Nous introduisons, à la première section, la démarche de conception simultanée par optimisation multicritère. Nous présentons à la section 6.2 les paramètres et les contraintes du problème d'optimisation, ainsi que le modèle du système utilisé pour l'optimisation. A

la section ??, nous définissons les critères à optimiser. Enfin, la section 6.3 illustre quelques résultats d'optimisation.

6.1 Introduction à la conception simultanée par optimisation

6.1.1 Conception simultanée

Contrairement à l'approche par la « conception séquentielle », l'approche par la « conception simultanée » permet de considérer le système dans sa globalité. Cette approche est plus adaptée à la conception de systèmes complexes tels que la locomotive hybride multisource, car l'optimisation "locale" de chacun des éléments pris isolément, n'assure aucunement l'optimalité de l'ensemble. Les couplages existant au sein du système peuvent évidemment influencer sur l'efficacité globale. L'optimisation des performances impose donc d'adopter une approche systémique globale où les caractéristiques fondamentales du système sont considérées de façon couplée [48, 52].

Pour concevoir des systèmes énergétiques optimisés de façon globale et dimensionnés au plus juste, il semble donc impératif d'évoluer vers une conception simultanée qui vise conjointement et en parallèle à la détermination de l'architecture, du dimensionnement et de la gestion énergétique de l'ensemble des éléments.

6.1.2 Processus d'optimisation

La boucle d'optimisation comporte deux blocs principaux : l'optimiseur basé sur un algorithme génétique de Pareto [47, 48, 52] couplé avec le modèle du système. Comme le montre la figure 6.1, l'optimiseur fait varier les paramètres selon des règles de type évolutionnaire. Pour chaque configuration candidate soumise par l'optimiseur, le modèle du système (modèle d'optimisation) évalue les contraintes du problème et les critères à optimiser. La population de configurations évaluées est ensuite triée par l'optimiseur qui sélectionne les solutions les mieux adaptées. About d'un certain nombre d'itérations, nous obtenons les configurations optimales au sens de Pareto (front de Pareto).

6.1.3 Organisation du modèle d'optimisation

Le processus d'optimisation réitère, pour N_{ind} individus et N_{gen} générations, l'optimisation des critères et des contraintes. Généralement, pour que l'optimisation converge, il convient de choisir, en fonction du nombre de paramètres, un nombre conséquent de générations et d'individus⁽¹⁾. Notre modèle d'optimisation compte 7 paramètres et nous avons choisi : $N_{\text{ind}} = 50$ individus et $N_{\text{gen}} = 2000$ générations, ce qui fait au total 100000 configurations analysées. Sachant que notre modèle d'optimisation coûte environ 20 s de simulation par mission, l'ensemble du processus prendrait plus d'un mois, si le modèle d'optimisation devait évaluer chacune des 100000 configurations. A chaque problème d'optimisation peut

⁽¹⁾ N_{ind} et N_{gen} sont d'autant plus élevés que le nombre de paramètres est important.

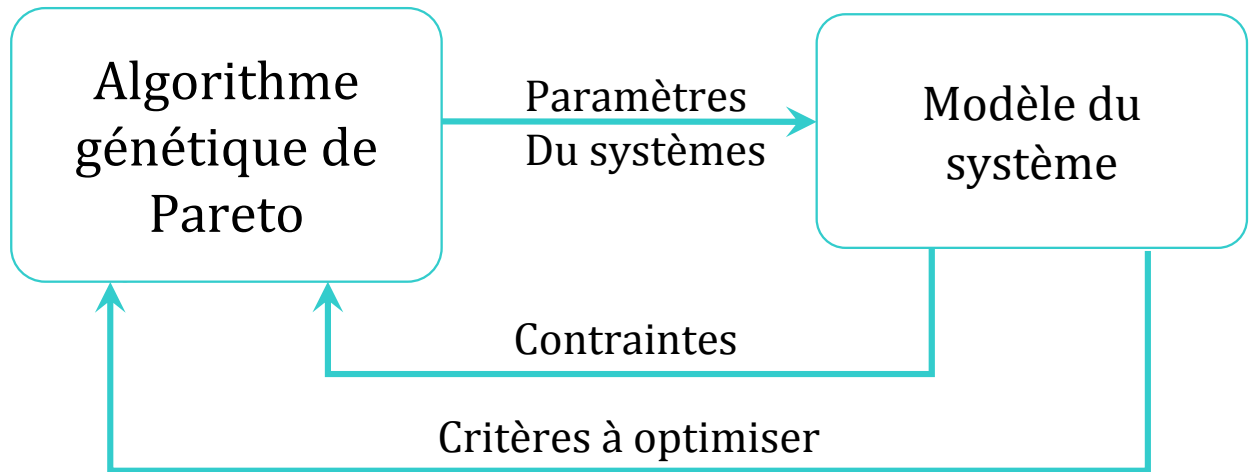


Fig. 6.1: Boucle d'optimisation

être associé un graphe de contrainte que l'on décompose en niveaux [52, 48]. Comme le montre la figure 6.2, le modèle d'optimisation de la locomotive hybride est organisé en trois niveaux. Au premier, nous estimons les contraintes qui dépendent directement des paramètres du système. Les configurations qui ne satisfont pas aux contraintes de pré-simulation sont systématiquement rejetées. Ainsi, la simulation du système n'est effectuée que pour les configurations ayant satisfait aux premières contraintes. Après la simulation du système, les contraintes restantes sont évaluées au niveau 2. Seules les configurations ayant satisfait à toutes les contraintes passent au niveau 3 pour l'évaluation des critères. Le problème d'optimisation de la locomotive hybride tel qu'il apparaît sur le graphe de la figure 6.2 compte 8 contraintes (g_1 à g_8) dont 5 en pré-simulation et 3 en post-simulation ainsi que 2 critères à optimiser.

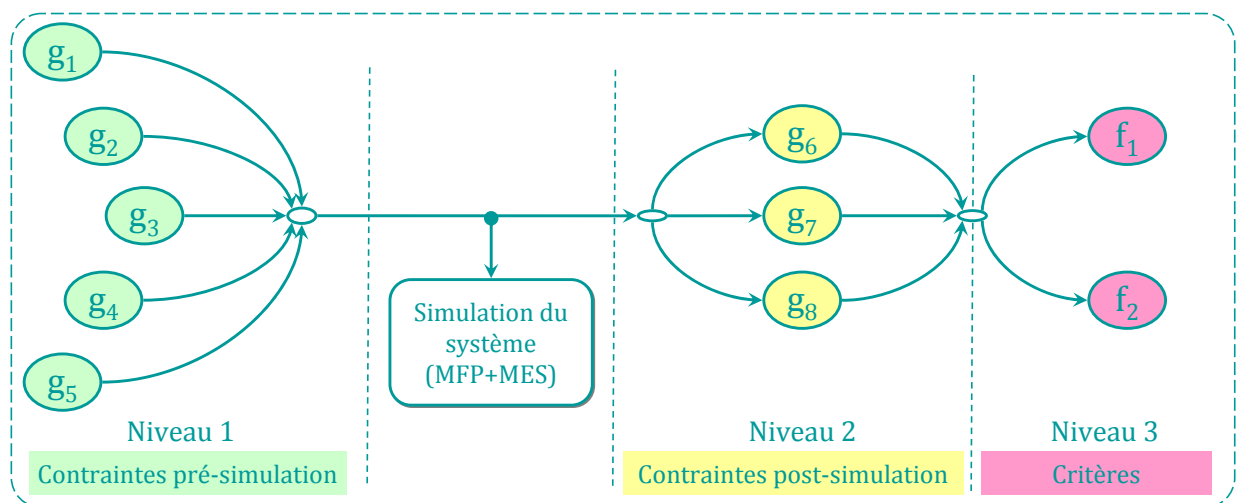


Fig. 6.2: Organisation du modèle d'optimisation de la locomotive hybride

La section qui suit définit les paramètres et les contraintes du problème ainsi les modèles utilisés pour l'optimisation. Ensuite, les critères à optimiser sont présentés à la section ??.

6.2 Paramètres et contraintes du problème d'optimisation

Dans cette section, nous présentons l'identification des paramètres et des contraintes du problème d'optimisation. Nous nous basons, en partie, sur les modèles analytiques établis à la section 4.3 du chapitre 4 sur l'étude de faisabilité. Nous utiliserons aussi les "cartographies dimensionnelles" issues de la phase de synthèse.

6.2.1 Préambule : cartographies dimensionnelles

La démarche de synthèse que nous avons présentée au chapitre 3, nous a permis de construire deux cartographies importantes : d'une part, la bijection ($F_{SC} \leftrightarrow N_{SC}$) permet d'associer, pour une mission donnée, à une fréquence de filtrage F_{SC} , un nombre unique de supercondensateurs N_{SC} et vice-versa (voir figure 6.3a) ; et d'autre part, l'ensemble des configurations possibles (N_{SC}, N_{BT}, P_{GEN}) décrivent une surface Ω (voir figure 6.3b).

Ces cartographies sont très utiles pour juger de la recevabilité d'une configuration ($N_{SCi}, N_{BTi}, P_{GENi}$) donnée, car elles définissent les minima dimensionnels. Comme le montre la figure 6.4a, nous déterminons, à partir de N_{SCi} , la fréquence F_{SCi} correspondante. Ensuite, la projection dans le plan (N_{BT}, P_{GEN}) de $\Omega^{(1)}$ nous permet de localiser la configuration candidate comme le montre la figure 6.4b. Si la configuration concernée se situe dans la zone A, entre les axes des coordonnées et la courbe de dimensionnement, alors elle ne satisfait pas aux minima de puissance et d'énergie. Par contre, si elle se situe dans la zone B alors il s'agit d'une configuration recevable. Nous verrons plus loin comment ces cartographies permettent la réduction du nombre de paramètres et rentrent dans la définition de certaines contraintes.

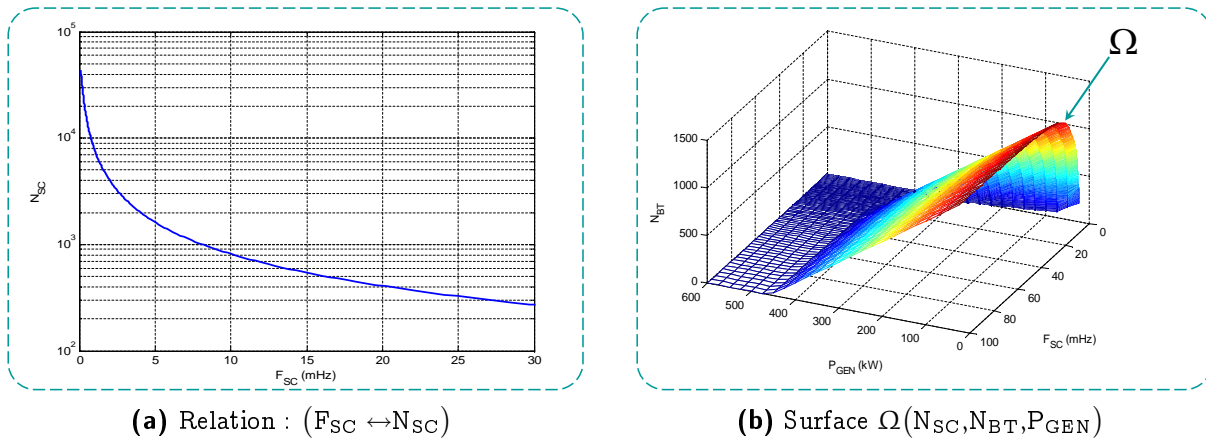


Fig. 6.3: Cartographies dimensionnelles pour la mission m_2

⁽¹⁾La considération de N_{SCi} permet le passage de la surface Ω à un plan.

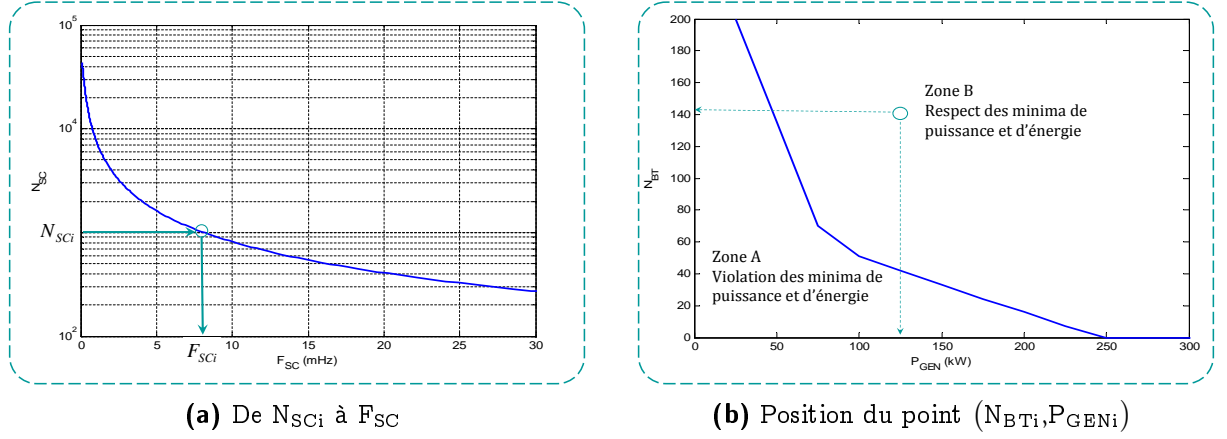


Fig. 6.4: Position de $(N_{SCi}, N_{BTi}, P_{GENi})$ par rapport aux minima de puissance et d'énergie

6.2.2 Paramètres du problème d'optimisation

En principe, on compte trois catégories de paramètres, chacune relative à une phase de conception particulière : il y a les paramètres liés à la définition de l'architecture du système, les paramètres associés au dimensionnement du système et les paramètres liés à la gestion énergétique. Dans le cadre de ce projet, nous nous sommes limités à une architecture unique : un bus continu de tension régulée, auquel sont connectés un groupe Diesel et un système de stockage (batterie et supercondensateur) ; les éléments de stockage sont reliés au bus continu à travers des hacheurs réversibles en courant et élévateurs vers le bus ; les éléments de stockage sont organisés en modules parallèles d'éléments mis en série. Cependant, il nous semble possible de considérer les nombres de modules parallèles de batteries (N_{pBT}) et de supercondensateurs (N_{pSC}) comme étant des paramètres liés à l'architecture.

$$\text{Architecture du système} \rightarrow \{N_{pSC}, N_{pBT}\}$$

La gestion énergétique "fréquentielle" étudiée au chapitre 3 est basée sur deux paramètres : la puissance nominale du groupe Diesel P_{GEN} et la fréquence de filtrage des missions F_{SC} .

$$\text{Gestion énergétique} \rightarrow \{P_{GEN}, F_{SC}\}$$

Quant aux paramètres liés au dimensionnement énergétique et électrique de la locomotive, il s'agit des nombres de modules parallèles de batteries (N_{pBT}) et de supercondensateurs (N_{pSC}), des nombres d'éléments en série par module de batteries (N_{sBT}) et par module de supercondensateurs (N_{sSC}), de la puissance nominale du groupe Diesel (P_{GEN}), la tension du bus continu (V_{BUS}) et de la fréquence de découpage des bras de hacheur (F_{dec}).

$$\text{Dimensionnement} \rightarrow \{P_{GEN}, N_{pSC}, N_{pBT}, N_{sSC}, N_{sBT}, V_{BUS}, F_{dec}\}$$

On distingue 8 paramètres au total, mais il est encore possible de réduire ce nombre. En effet, comme nous l'avons montré à la sous-section précédente, le choix du nombre de supercondensateurs détermine de façon unique, pour une mission donnée, la fréquence

de filtrage F_{SC} qui permet une utilisation optimale des supercondensateurs. Au final, le problème d'optimisation comporte 7 paramètres.

$$\Omega_{\text{Paramètres}} = \{P_{\text{GEN}}, N_{p_{SC}}, N_{p_{BT}}, N_{s_{SC}}, N_{s_{BT}}, V_{\text{BUS}}, F_{\text{dec}}\} \quad (6.1)$$

◆ Paramètre P_{GEN}

Nous considérons que la puissance nominale du groupe Diesel est un paramètre continu pouvant prendre n'importe quelle valeur entre 50 et 600 kW.

$$50 \text{ kW} \leq P_{\text{GEN}} \leq 600 \text{ kW} \quad (6.2)$$

◆ Paramètres $N_{s_{SC}}, N_{p_{SC}}, N_{s_{BT}}, N_{p_{BT}}$

Ces quatre paramètres sont des entiers (discrets). Nous nous servons des contraintes les plus évidentes pour déterminer les intervalles de variation de ces paramètres. L'étude de faisabilité réalisée au chapitre 4 nous a permis de calculer les limites maximales des nombres de batteries ou de supercondensateurs pouvant rentrer dans le volume total disponible.

$$\begin{cases} N_{s_{SC}} \times N_{p_{SC}} \leq 7000 \\ N_{s_{BT}} \times N_{p_{BT}} \leq 3000 \end{cases} \quad (6.3)$$

Par ailleurs, sachant que la batterie FNC1502HR admet une tension nominale de 1.2 V et que le supercondensateur B49410B2506Q000 admet une tension nominale de 2.5 V, la limitation de la tension de bus à 650 V (marge de 100 V par rapport à la limite normative de 750 V) nous permet de déduire les nombres maximaux de batteries et de supercondensateurs en série.

$$\begin{cases} N_{s_{SC}} \leq 650/2.5 = 260 \\ N_{s_{BT}} \leq 650/1.2 = 542 \end{cases} \quad (6.4)$$

Des systèmes d'inéquations 6.3 et 6.4, nous déduisons :

$$\begin{cases} 0 < N_{s_{SC}} \leq 260 \\ 0 < N_{p_{SC}} \leq 7000 \end{cases} \quad \begin{cases} 0 < N_{s_{BT}} \leq 542 \\ 0 < N_{p_{BT}} \leq 3000 \end{cases} \quad (6.5)$$

◆ Paramètre F_{dec}

Nous limitons la fréquence de découpage à 10 kHz. Cette limite nous paraît convenable, au vu des pratiques ferroviaires. Sa valeur minimale est fixée à 1 kHz.

$$1 \text{ kHz} \leq F_{SC} \leq 10 \text{ kHz} \quad (6.6)$$

◆ Paramètre V_{BUS}

La contrainte normative nous impose une tension maximale, à bord de la locomotive, de 650 V. Dans la configuration du démonstrateur LHyDIE, les convertisseurs de traction

sont dévolteurs vers les moteurs de traction. Or les moteurs, en pleine vitesse, admettent une tension voisine de 400 V, ce qui impose une tension minimale de 400 V sur le bus de tension. Mais cette contrainte nous paraît trop restrictive. Nous faisons l'hypothèse que le système de traction pourrait être plus moderne et moins rigide par rapport à la tension du bus continu⁽¹⁾. Nous prendrons donc un intervalle plus large pour la tension du bus continu.

$$50 \text{ V} \leq V_{\text{BUS}} \leq 650 \text{ V} \quad (6.7)$$

Dans la suite de ce chapitre, toute configuration candidate sera notée X et s'écrit :

$$X = \left\{ P_{\text{GEN}}, N_{\text{pSC}}, N_{\text{pBT}}, N_{\text{sSC}}, N_{\text{sBT}}, V_{\text{BUS}}, F_{\text{dec}} \right\}$$

6.2.3 Modèle d'optimisation

La figure 6.5 montre le modèle d'optimisation de la locomotive hybride. On retrouve clairement la hiérarchisation des contraintes telles que nous l'avons expliquée plus haut. A partir des paramètres du système, les contraintes en pré-simulation sont évaluées à l'aide de modèles analytiques. Lorsque les contraintes en pré-simulation sont satisfaites, le processus engage la simulation du système. Le modèle du système simulé est un couplage intelligent entre le modèle en flux de puissance et le modèle électrique statique. En effet, comme nous l'avons déjà fait au chapitre 4, nous utilisons le modèle en flux de puissance sur l'ensemble de la mission, puis nous localisons sur la mission des éléments de stockage, les portions les plus sévères⁽²⁾. Ensuite, ces points dimensionnants sont simulés avec le modèle électrique statique, pour en déduire les courants et les tensions en sortie des convertisseurs. Deux modèles dimensionnels interviennent en post-simulation pour l'estimation des contraintes de post-simulation et des critères.

- Un modèle dimensionnel des convertisseurs permet alors de dimensionner les caractéristiques électriques, en coût et en volume, le nombre de bras de hacheurs nécessaires par convertisseur, les inductances de lissage. Ce travail a été fait sur la base des travaux de J. Regnier [35].
- Un modèle de durée de vie des batteries et des supercondensateurs permet, à partir des profils des états de charge des batteries et des supercondensateurs, d'estimer leur durée de vie. Nous avons abordé cette problématique au chapitre 4. L'annexe D apporte quelques éléments de compréhension.

Les sous-sections suivantes présentent les contraintes prés-simulation et post-simulation.

⁽¹⁾Rigoureusement, l'optimisation devrait prendre en compte l'ensemble de la locomotive, du système énergétique à la charge (moteurs de traction et auxiliaires) : la tension du bus est commune à ces deux sous-systèmes éléments. La configuration optimale du système énergétique n'est pas forcément celle qui sied le mieux au système de traction.

⁽²⁾L'identification des zones sévères est basée uniquement sur les valeurs crêtes de la puissance, sans prise en compte de sa dynamique. Rigoureusement, étant donné que le but visé est le dimensionnement électrique et thermique des convertisseurs, il aurait fallu considérer la dynamique de la puissance qui peut influencer surtout le dimensionnement thermique. Notre approche approximative peut être légèrement surdimensionnante surtout pour ce qui concerne les convertisseurs des supercondensateurs.

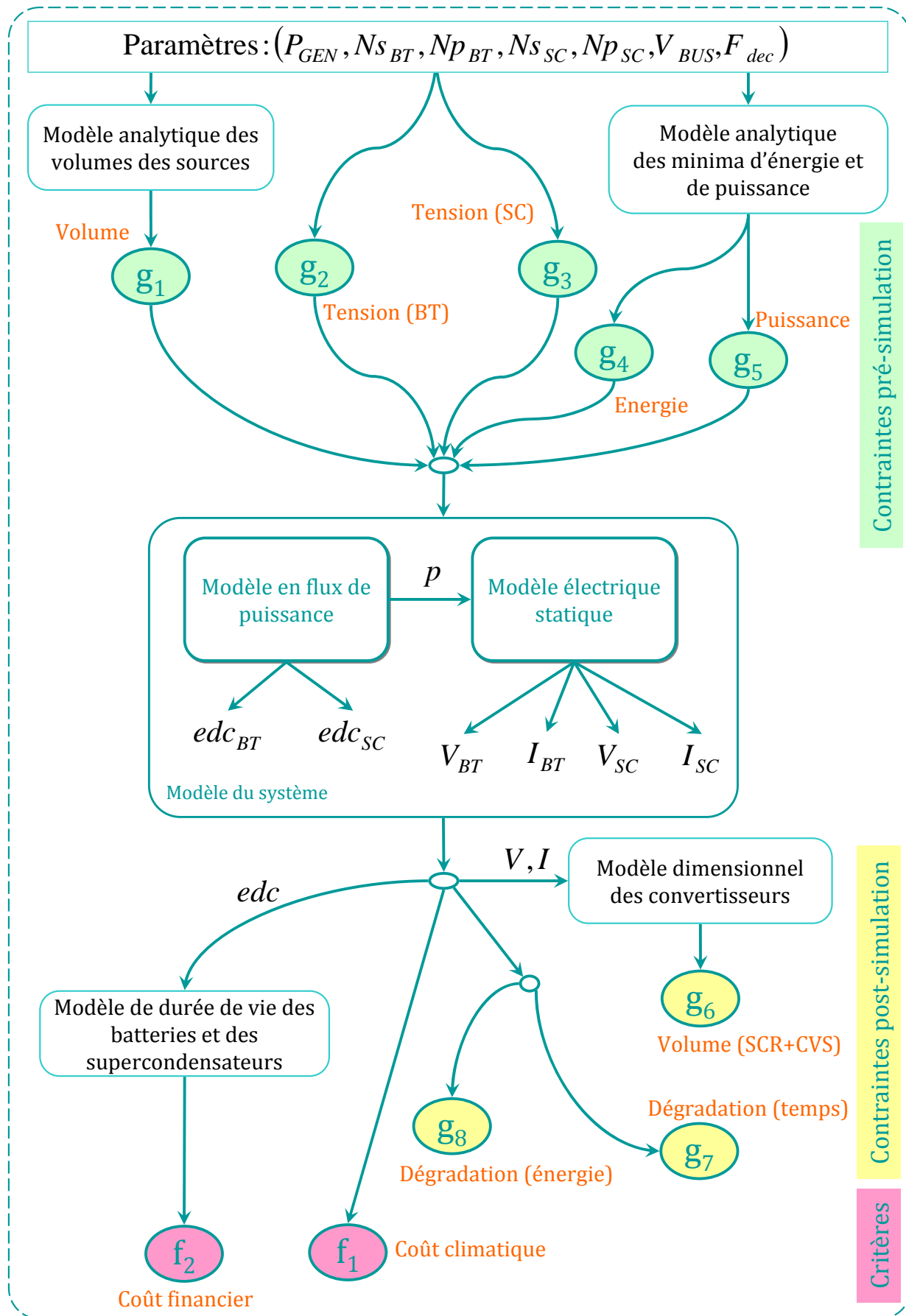


Fig. 6.5: Modèle d'optimisation

6.2.4 Contraintes en pré-simulation

Les contraintes en pré-simulation permettent de juger de l'irrecevabilité d'une configuration X , directement à partir de ses paramètres, sans avoir besoin de simuler le système.

◆ $g_1(X)$: la contrainte liée au volume des sources de puissance et d'énergie $g_1(X)$ traduit le fait que l'encombrement des sources de puissance et d'énergie, sans compter le volume des convertisseurs de stockage, rentre ou non dans le volume disponible. A la section 4.2.1 du chapitre 4, nous avons fait l'estimation approximative des volumes du groupe Diesel, du pack de batteries et du pack de supercondensateurs. Le volume du groupe Diesel s'écrit en fonction de sa puissance nominale de la façon suivante :

$$\text{Vol}_{GE}(\text{en m}^3) = 0.03 \times P_{GEN}(\text{en kW}) + 0.09 \quad (6.8)$$

Le volume du pack de batteries, sans les convertisseurs, s'écrit :

$$\text{Vol}_{BT} = \lambda_{BT,ass} \times \text{Vol}_{BT}^0 \cdot N_{BT} \quad (6.9)$$

où $\lambda_{BT,ass} = 1.71$ est le coefficient d'assemblage et $\text{Vol}_{BT}^0 = 4.33 \text{ L}$ est le volume d'un élément de batterie FNC 1502HR. On peut écrire plus simplement :

$$\text{Vol}_{BT}(\text{en m}^3) = 7.2e^{-3} \times N_{sBT} \cdot N_{pBT} \quad (6.10)$$

Pour ce qui concerne le pack de supercondensateurs on a :

$$\text{Vol}_{SC}(\text{en m}^3) = 2.1e^{-3} \times N_{sSC} \cdot N_{pSC} \quad (6.11)$$

Rappelons que le volume disponible pour recevoir l'ensemble des éléments du système énergétique vaut 32 en m^3 . La contrainte $g_1(X)$ s'écrit de la façon suivante :

$$g_1(X) = \text{Vol}_{GE} + \text{Vol}_{BT} + \text{Vol}_{SC} - 32 \quad (6.12)$$

◆ $g_2(X)$ et $g_3(X)$

Ces deux contraintes sont liées à la structure élévatrice des hacheurs (des éléments stockage vers le bus). Soit α_{max} la limitation du rapport cyclique due à la prise en compte du temps mort entre les commutations des IGBTs, les contraintes $g_2(X)$ (relative aux batteries) et $g_3(X)$ (relative aux supercondensateurs), imposent les conditions suivantes :

$$\begin{cases} V_{BTmax} \leq \alpha_{max} \cdot V_{BUS} \\ V_{SCmax} \leq \alpha_{max} \cdot V_{BUS} \end{cases} \quad (6.13)$$

Sachant que la tension maximale d'un élément de batterie vaut : 1.34 V et que celle d'un élément de supercondensateur vaut 2.5 V , nous avons :

$$\begin{cases} g_2(X) = 1.34 \times N_{sBT} - \alpha_{max} \cdot V_{BUS} \\ g_3(X) = 2.5 \times N_{sSC} - \alpha_{max} \cdot V_{BUS} \end{cases} \quad (6.14)$$

◆ $g_4(X)$ et $g_5(X)$

Comme le montre la figure 6.6, la cartographie dimensionnelle dans le plan (N_{SC}, N_{BT}) met en évidence le déficit ou l'excès en puissance et en énergie de la configuration candidate X par rapport aux minima de puissance P_{GENmin} et d'énergie N_{BTmin} .

Remarque: Il nous semble indispensable d'expliciter le sens des variables P_{GENmin} et N_{BTmin} par rapport à la configuration candidate X . En effet, P_{GENmin} représente la puissance minimale de groupe Diesel qu'il faudrait que la configuration X possède pour être recevable sans modification de son pack N_{BT} batteries. Réciproquement, N_{BTmin} représente le nombre minimal de batteries qu'il faudrait que la configuration X possède pour être recevable, sans modification de sa puissance Diesel P_{GEN} (voir figure 6.6).

Les contraintes $g_4(X)$ et $g_5(X)$ liées aux minima respectifs d'énergie et de puissance sont définies par :

$$\begin{cases} g_4(X) = N_{BTmin} - N_{BT} \\ g_5(X) = P_{GENmin} - P_{GEN} \end{cases} \quad (6.15)$$

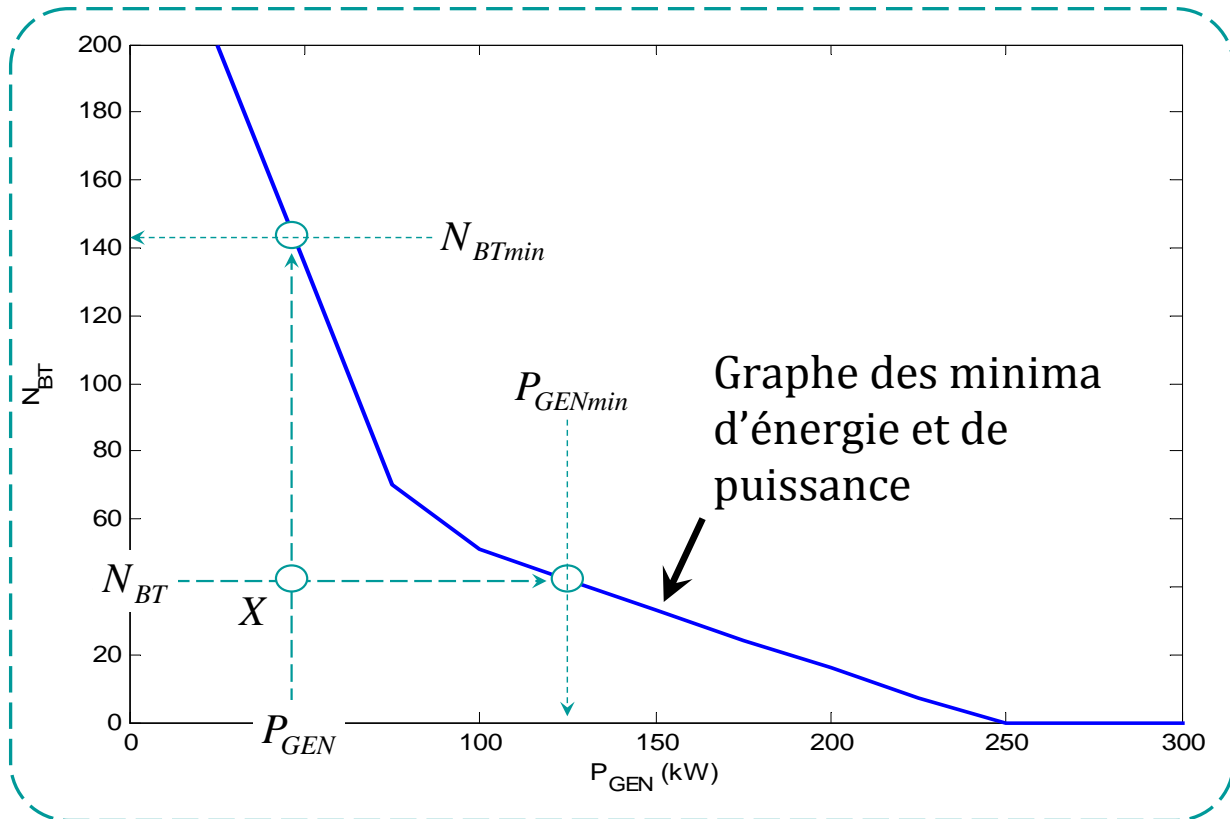


Fig. 6.6: Contraintes liées aux minima d'énergie et de puissance (cas d'un nombre important de supercapacités)

6.2.5 Contraintes en post-simulation

♦ $g_6(X)$: C'est la contrainte de volume système. En effet, la première contrainte de volume n'intègre que le volume des sources embarquées. A l'issue du dimensionnement des convertisseurs, une estimation approximative de leur volume est faite (V_{CVS}). La contraintes de volume se précise davantage :

$$g_6(X) = g_1(X) + Vol_{CVS} = Vol_{GE} + Vol_{BT} + Vol_{SC} + Vol_{CVS} - 32 \quad (6.16)$$

♦ $g_7(X)$ et $g_8(X)$: Ce sont les contraintes relatives à la dégradation des missions. $g_7(X)$ permet de contenir la dégradation temporelle que nous avons évoquée au chapitre 4 (§4.2.2). Dans le cadre de l'optimisation, la contrainte de dégradation temporelle a été révisée à la baisse : nous tolérons désormais jusqu'à 40% de dégradation temporelle. $g_7(X)$ s'écrit :

$$g_7(X) = \frac{d_{eff} - d_{trac}}{d_{trac}} - 0.4 \quad (6.17)$$

avec d_{trac} la durée de traction et d_{eff} la durée effective de la mission, phase de recharge des batteries comprise.

Quant à la contrainte $g_8(X)$, elle limite la dégradation énergétique de la mission. En effet, lors de la simulation du modèle en flux de puissance, nous comptabilisons l'énergie manquante à la réalisation de la mission, en intégrant les défauts de puissance. $g_8(X)$ est donnée par la formule :

$$g_8(X) = \frac{E_{manquante}}{E_{totale}} - 0.01 \quad (6.18)$$

E_{totale} représente l'énergie totale consommée par la mission ; la limitation du déficit d'énergie est fixée à 1%.

6.3 Analyse des résultats de l'optimisation

Dans cette section, nous allons présenter les résultats d'optimisation pour différents types de missions. Pour cela, nous considérons la mission m_2 dominant le segment de triages, la mission m_8 du segment de dessertes locales⁽¹⁾ et enfin, le couple (m_2, m_{11}) pour symboliser les missions mixtes.

6.3.1 Locomotives référentielles

Deux locomotives nous serviront de référence tout au long de cette analyse : il s'agit du démonstrateur LHyDIE dimensionné au chapitre 4 et d'une locomotive Diesel moderne de 600 kW. Le tableau ci-après donne les valeurs des critères selon le type de mission

⁽¹⁾La mission m_{11} est la plus sévère du segment de dessertes locales, mais puisque LHyDIE été révisée à la baisse et ne permet pas de passer la mission m_{11} , normalement, sans violer les limitations de courant. Nous avons choisi prendre la deuxième mission sévère m_8 comme étant la mission "témoin" du segment de dessertes.

privilegié. On note que quel que soit le type de mission privilégié⁽¹⁾ LHyDIE est toujours moins polluante et moins chère à exploiter que la locomotive Diesel. Cependant, délivrés de sorte, les critères sont assez illisibles et ne facilitent pas les comparaisons. Nous allons choisir pour la suite la locomotive Diesel moderne comme modèle de référence en matière de coût financier et de coût climatique.

Tab. 6.1: Caractéristiques des locomotives de référence

Critères		Type de mission		
		Triage (m ₂)	Desserte (m ₁₁)	Mixte (m ₂ , m ₁₁)
Locomotive Diesel	f ₁ (en k€/an)	20.3	52	41.8
	f ₂ (en tCO ₂ /an)	177	341	286
LHyDIE	f ₁ (en k€/an)	16.8	46.5	37
	f ₂ (en tCO ₂ /an)	136	296	228

6.3.2 Optimisation pour le segment de desserte

♦ Analyse dans le plan des critères

La figure 6.7 montre les résultats de l'optimisation de la locomotive hybride pour le segment de dessertes locales. On note que les solutions du front de Pareto améliorent, toutes, le démonstrateur LHyDIE sur le plan de la pollution. Certaines solutions du front de Pareto améliorent nettement le démonstrateur suivant les deux critères d'optimisation. Sachant le dimensionnement de LHyDIE est imposé essentiellement par les missions de dessertes locales, nous pouvons d'ores et déjà conclure que la configuration du démonstrateur n'est pas optimale au sens de Pareto selon les critères de coût financier et de coût climatique. En zoomant sur les solutions du front de Pareto, nous observons que ces solutions admettent un nombre important de batteries associés à de petits groupes Diesel de 151 à 174 kW, mais un très faible nombre de supercondensateurs. Les trois points mis en évidence à la figure 6.7 ainsi que le point-LHyDIE sont très intéressants à analyser. On note d'une façon générale que le coût climatique s'aggrave avec la croissance de la taille du groupe Diesel. Mais, contrairement à ce que nous avons pu observer au chapitre 4, sur le critère de coût d'investissement, le coût financier annuel (f_1) ne croît pas, "franchement", avec le nombre de batteries. Le passage de P1 (1992 batteries) à P2 (2070 batteries), soit 78 batteries en plus, provoque une augmentation du coût financier de 3%. Dans le même temps, le passage de P2 (2070 batteries) à P3 (1343 batteries), soit une diminution de 727 batteries, provoque également une augmentation de plus de 4%. Ces observations semblent contradictoires. Comment les expliquer ?

⁽¹⁾Nous parlons de "type mission privilégié" car les critères sont estimés avec l'hypothèse que le type de la mission concerné est le seul réalisé par l'engin sur une année, ce qui n'est pas rigoureusement vrai.

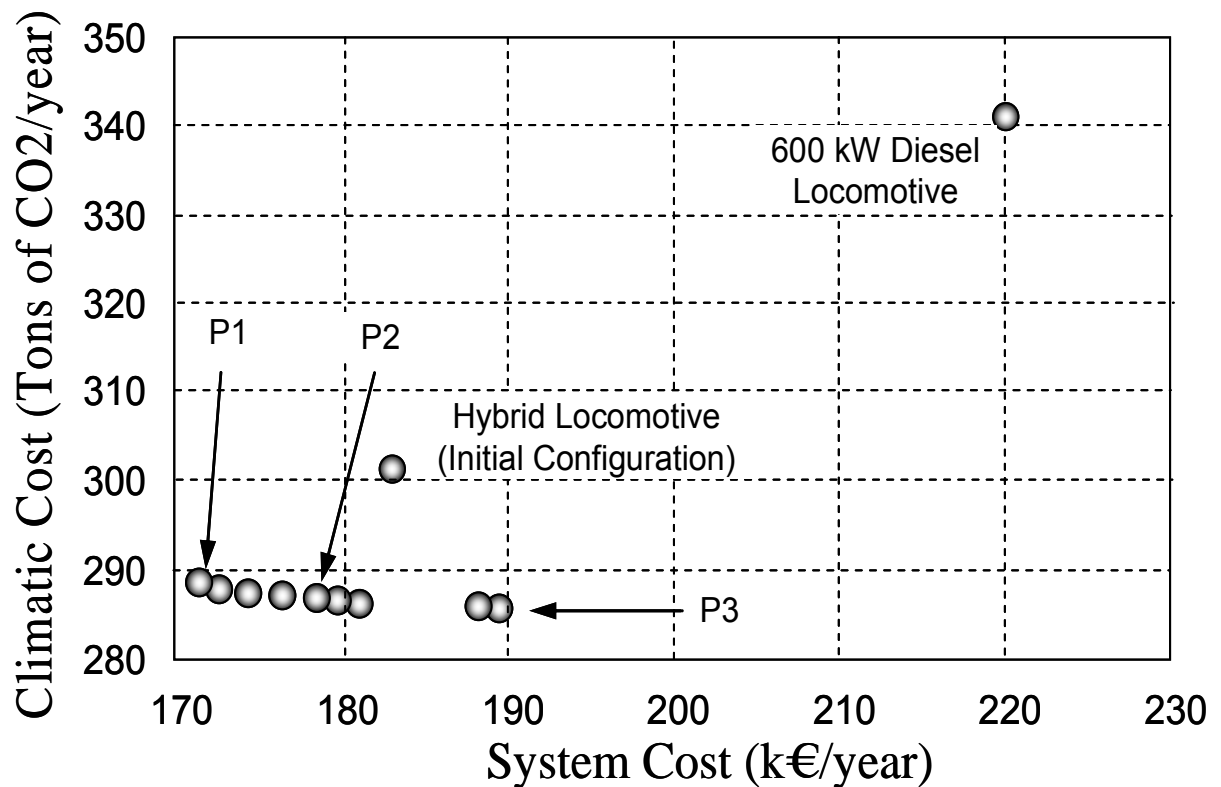


Fig. 6.7: Front de Pareto pour le segment de dessertes locales

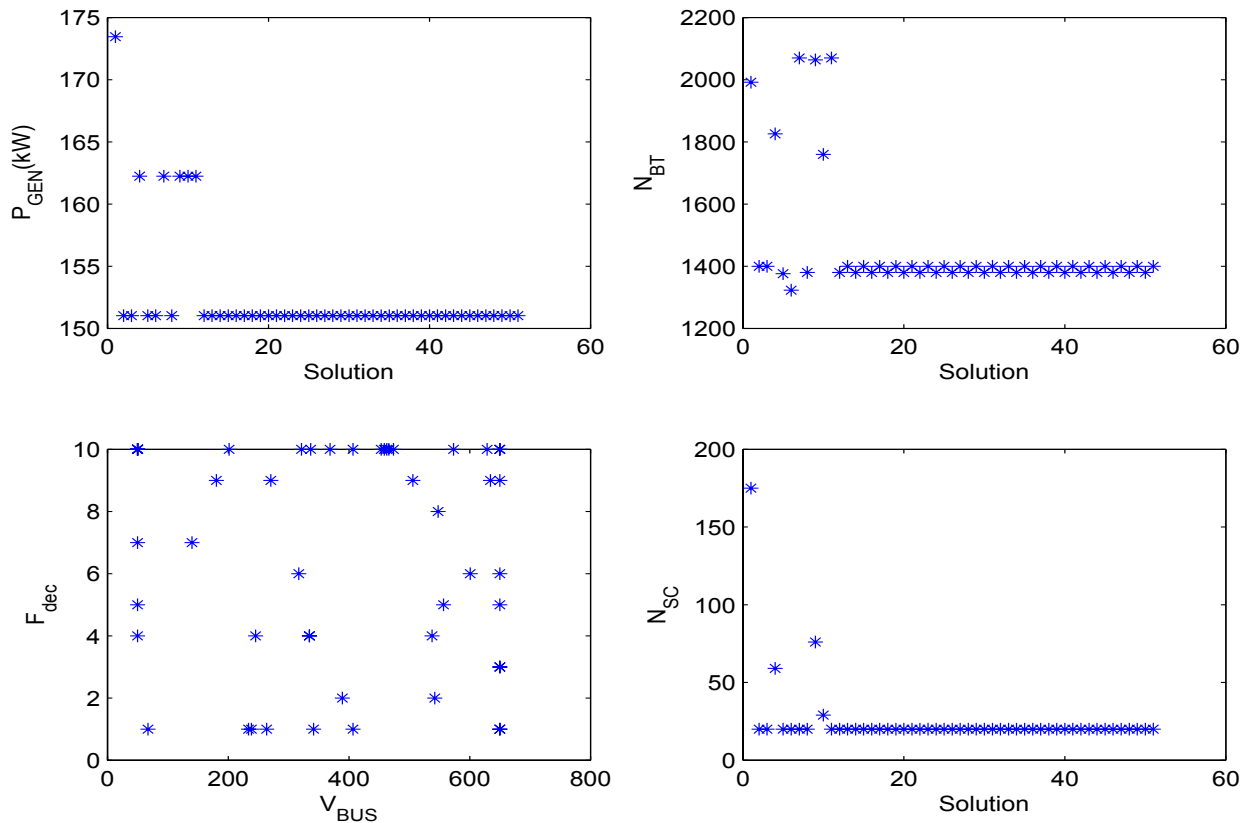
Le tableau 6.2 montre le calcul des sous-critères d'optimisation pour des missions de desserte locale. On note que le passage de P1 (174 kW Diesel, 1992 batteries) à P2 (162 kW Diesel, 2070 batteries) s'accompagne de l'augmentation du coût d'éléments de stockage car la réduction du groupe Diesel entraîne un cyclage plus profond des batteries). En d'autres termes, l'ajout des 78 batteries supplémentaires ne suffit pas pour compenser le déficit de puissance Diesel de 10 kW entre P1 et P2. Alors, les batteries sont déchargées plus en profondeur d'où l'augmentation du coût-batterie et donc du critère coût financier. De la même façon, en réduisant simultanément le groupe Diesel et le nombre de batteries (passage de P2 à P3), on dégrade considérablement le cyclage des batteries d'où le coût élevé du stockage et du coût financier.

♦ Analyse paramétrique du front de Pareto

La figure 6.8 montre l'évolution des paramètres du système pour les configurations du front de Pareto. On note globalement que les batteries sont préférées aux supercondensateurs et que la tendance est aux petits groupes Diesel. La tension du bus continu et la fréquence de découpage sont indifféremment choisis dans les limites imposées à l'optimiseur, ce qui traduit leur faible influence sur les critères optimisés. En effet, la tension du bus continu et la fréquence de découpage sont plutôt des paramètres d'optimisation du volume des convertisseurs. La contrainte de volume devait conduire à l'optimisation indirecte du volume des convertisseurs. Mais, au vu de la faible influence de ce dernier sur le volume global, l'optimiseur n'a pas cherché à l'améliorer. Ce travail pourrait être réalisé

Tab. 6.2: Caractéristiques des solutions analysées pour le segment de dessertes locales

Caractéristiques	Points analysés			
	LHyDIE	P1	P2	P3
Puissance Diesel (en kW)	215	173.5	162.2	151
Batteries $N_{sBT} \times N_{pBT}$	300×4	249×8	230×9	143×10
Supercap $N_{sSC} \times N_{pSC}$	200×8	174×1	20×1	20×1
Coût climatique tCO_2/an	301	288	287	286
Coût du fuel (en k€/an)	153	146	145	145
Coût du stockage (en k€/an)	7.6	7	18	27
Coût système (en k€/an)	183	172	178	189


Fig. 6.8: Etude paramétrique du front de Pareto pour le segment de dessertes locales

par une optimisation locale spécifique.

Notons pour conclure l'analyse paramétrique que la concentration de la puissance nominale des groupes Diesel vers 150 kW est une conséquence de la contrainte de dégradation temporelle qui limite la réduction de la taille du groupe Diesel. Nous avons déjà mis en évidence ce phénomène à la section 4.2.2 du chapitre 4.

Remarque: Il apparaît sur le graphe de la figure 6.7 que les solutions sont quasiment regroupées suivant l'axe de coût climatique, ce qui manifeste l'absence de compromis dans le problème d'optimisation. Ce comportement s'explique par le fait que le critère de pollution f_2 compte double. En effet, le coût climatique étant proportionnel à la consommation de fuel, il intervient aussi dans le coût financier, ce qui crée une dépendance de type proportionnel entre nos deux critères d'optimisation, d'où l'absence de compromis. Il y a donc une prédominance du critère "coût climatique" sur le critère financier. Cependant, ce comportement n'enlève rien à l'optimalité des solutions trouvées.

Notons par ailleurs que la raréfaction de solutions optimales est une conséquence des effets conjugués de la multiplicité des contraintes du problème d'optimisation (au nombre de 7) et du caractère discret de la plupart de paramètres [35, 48, 52].

6.3.3 Optimisation pour les triages et pour les missions mixtes

La figure 6.9 montre les résultats de l'optimisation de la locomotive hybride pour le segment de triages. On note, comme dans le cas des dessertes locales, qu'il y a un très faible nombre de solutions optimales. Les solutions du front de Pareto améliorent, toutes, le démonstrateur LHyDIE. On note aussi que le démonstrateur LHyDIE, sur la base des missions de triage, est très loin des performances climatique et financier d'une locomotive hybride optimale. Cela s'explique par le fait que le dimensionnement de LHyDIE est imposé essentiellement par les missions de dessertes locales. Même si nous n'avons pas actuellement assez d'éléments pour y répondre, la question se pose, de savoir s'il est préférable de concevoir une locomotive hybride de triage et de desserte locale ou deux locomotives destinées chacune à un segment particulier. Étant donné que l'optimisation permet d'améliorer LHyDIE simultanée par rapport aux missions de desserte locale et aux missions de triage, nous répondrons, sous réserve d'études comparatives plus approfondies, qu'une locomotive hybride n'est plus facilement optimisable si elle est destinée à un segment spécifique voire une mission particulière.

La figure 6.10 montre l'évolution des paramètres du système pour les configurations du front de Pareto. Comme dans le cas des dessertes locales, on note globalement que les batteries sont préférées aux supercondensateurs et que la tendance est aux petits groupes Diesel voire très petits groupes dans ce cas. La tension du bus continu, contrairement aux observations faites à la sous-section précédente, semble tendre vers des valeurs plus élevées.

Pour ce qui concerne les missions mixtes, les résultats de l'optimisation sont illustrés à la figure 6.11. Ces résultats sont semblables à ceux relatifs aux missions de dessertes locales, preuve que dans les missions mixtes, les dessertes s'imposent aux triages.

6.3.4 Conclusion

Cette section d'analyse des résultats de l'optimisation est pleine d'enseignements. L'optimisation de la locomotive hybride montre, pour les missions de triage et de desserte locale, que la minimisation du critère de pollution et du critère de coût financier imposent des

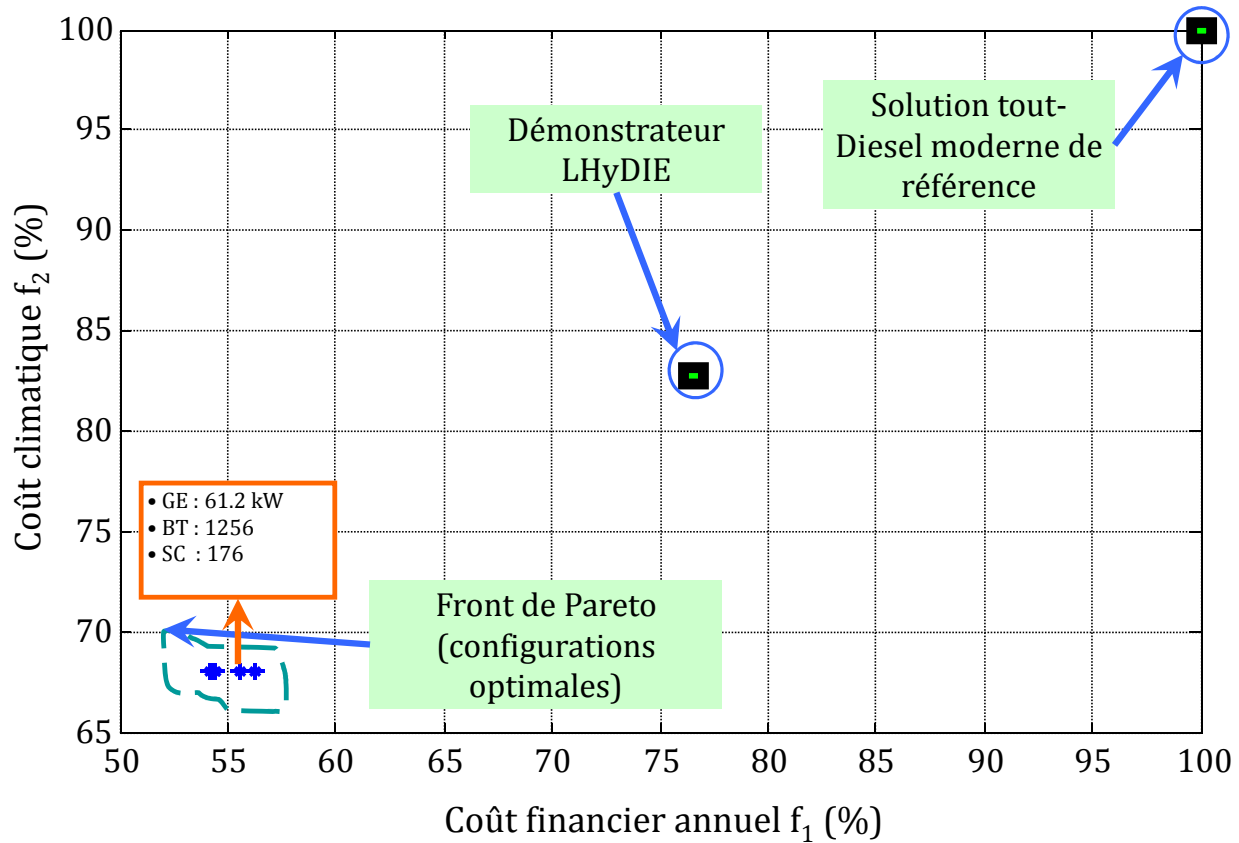


Fig. 6.9: Front de Pareto pour le segment de triages

configurations de locomotive hybride constituées d'un petit groupe Diesel (≈ 150 kW pour les dessertes et les missions mixtes ; 62 kW pour les triages) associé à un nombre conséquent de batteries. L'optimisation a tendance à "réduire" le nombre de supercondensateurs. Cependant, nous éviterons de tirer la conclusion de l'inadéquation des supercondensateurs aux missions ferroviaires. Une étude plus approfondie, menée sur un éventail plus large de missions serait nécessaire pour trancher cette question.

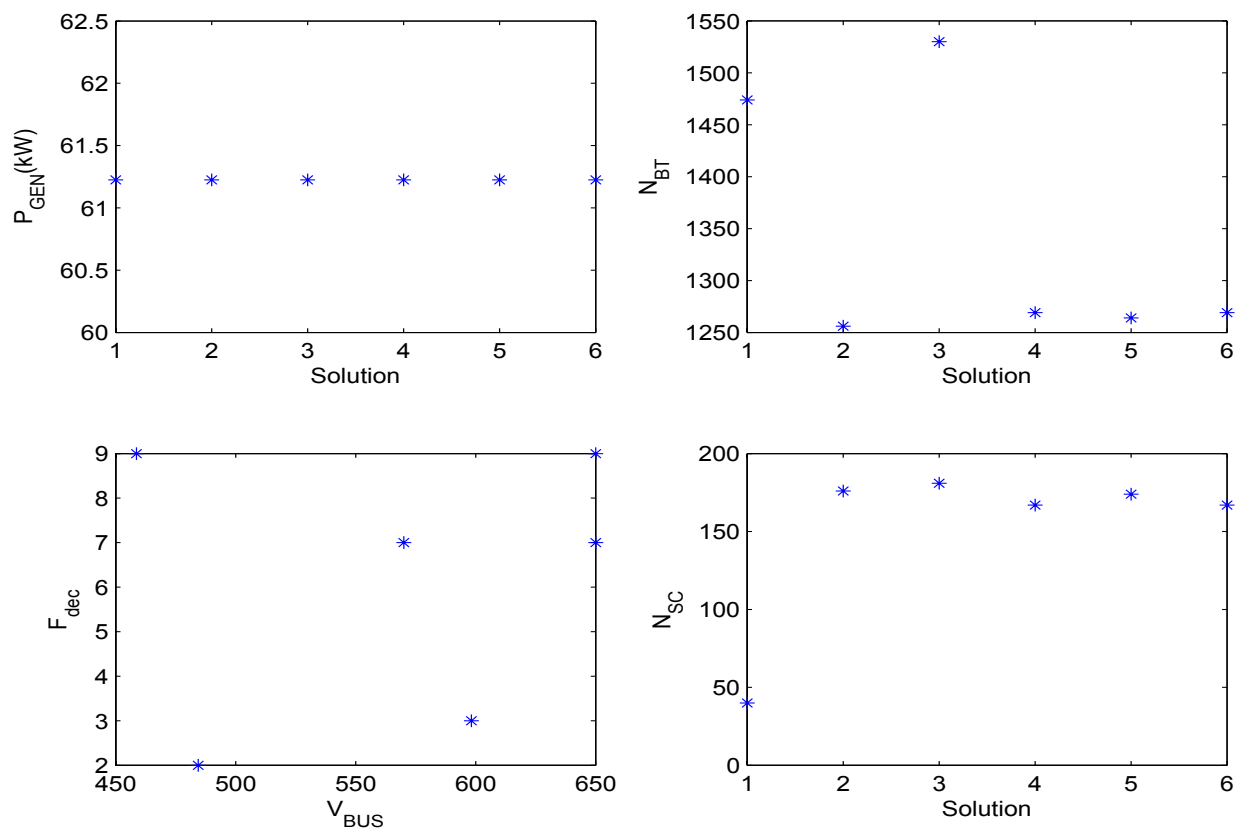


Fig. 6.10: Etude paramétrique du front de Pareto pour le segment de triages

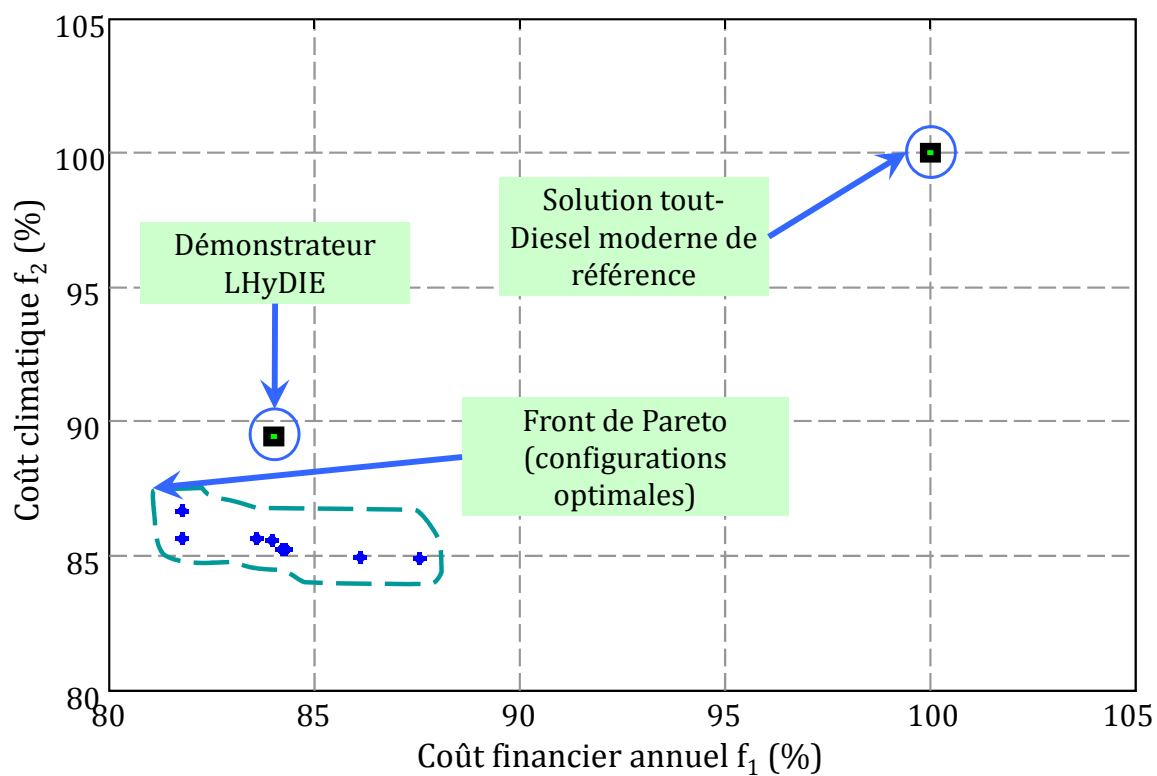


Fig. 6.11: Front de Pareto pour le segment mixte

6.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une démarche de conception simultanée par optimisation multicritère d'une locomotive hybride. Nous avons notamment, présenté le modèle du système utilisé pour le processus d'optimisation, identifié les paramètres, posé les contraintes relatives à la conception de la locomotive hybride. Nous avons aussi montré que l'ensemble des critères de faisabilité étudiés au chapitre 4 peuvent se réduire à deux critères principaux : le coût système (coût financier) et le coût climatique. Les résultats de l'optimisation nous ont permis d'identifier les configurations les plus intéressantes dans l'état actuel de l'art.

Conclusion générale

Devant l'évolution spectaculaire du prix du pétrole et dans un contexte écologique de plus en plus prégnant, le sujet traité dans ce mémoire fait partie intégrante d'une « actualité brûlante » sur un plan sociétal. S'il paraît évident, à l'issue de cette étude et de l'état de l'art mené au premier chapitre, que l'idée d'hybridation ferroviaire est tout à fait pertinente, tout du moins pour certains segments de missions spécifiques, il serait difficile et probablement hasardeux, vu la précision de certains de nos indicateurs, de donner des conclusions quantitatives précises. Nous retenons donc essentiellement des tendances qualitatives couplées à la pertinence de la démarche de conception systémique décrite dans ce mémoire et mise en pratique sur un cas d'étude particulièrement riche.

L'étude est née du cahier des charges de la locomotive hybride LHyDIE (Locomotive Hybride de Démonstration et d'Investigation en Énergétique) spécifié sous la forme d'un ensemble de quinze missions dites de « desserte locale » et de « triage ». Couplé à l'importance primordiale de la notion de mission, l'existence d'une locomotive à reconcevoir imposait des contraintes d'encombrement et de masse.

Pour les partenaires industriels et universitaires du projet, l'objectif était d'optimiser la conception de la locomotive en termes d'architecture, de dimensionnement et de gestion. D'autre part, il s'agissait pour la SNCF d'acquérir un savoir faire en matière de spécification des futurs cahiers des charges et de se placer en capacité d'analyser les futures offres de chaînes de traction hybrides. De plus, il s'agissait d'acquérir des connaissances plus précises en terme de nouvelles technologies de production (diesel à bio-carburant, pile à combustible) et de stockage d'énergie (accumulateurs, supercondensateurs, volant d'inertie). En complément des études périphériques menées par l'« équipe projet LHyDIE », les tendances dégagées dans cette thèse contribuent à atteindre globalement ces objectifs. Parmi les cibles visées, nous nous sommes principalement focalisés sur la démarche de conception systémique en exploitant la richesse de ce cas d'étude et du cahier des charges associé :

- une première phase de l'étude a ainsi concerné une approche de « conception séquentielle » consistant à synthétiser le dimensionnement et la gestion énergétique de la

locomotive hybride. Nous avons proposé et développé une gestion énergétique originale basée sur un partage des missions dans le plan fréquentiel, entièrement compatible vis-à-vis de la nature des dispositifs de stockage embarqués. Les dimensions et choix effectués en terme de stratégie de gestion issus de cette thèse sont actuellement directement exploités sur un banc d'essai à l'échelle 1/4 existant dans les locaux de la SNCF (EIMM Le Mans). Dans une seconde étape, ces choix, après validation sur le banc d'essai, seront exploités à bord de la locomotive LHYDIE en cours de construction. Nous avons ainsi présenté plusieurs niveaux de modélisation, à partir desquels nous avons validé l'architecture, le dimensionnement allant jusqu'à la gestion d'énergie en temps réel de la locomotive LHYDIE.

- Une seconde phase d'étude a consisté à reprendre le problème selon une démarche de « conception simultanée », basée sur un modèle systémique dimensionnel couplé à un outil d'optimisation multicritère. Cet outil permet d'effectuer simultanément différents choix paramétriques inhérents aux dimensions, mais aussi à la stratégie de gestion voire à l'architecture système. Les principaux critères visés sont la consommation et pollution, la durée de vie des composants (de stockage en particulier) et le coût système. L'objectif de cette seconde démarche était de dégager, suivant la nature des missions ou segments de missions et les projections du coût du gasoil, les tendances fortes sur les trains hybrides du futur.

Parmi les idées fortes et les points essentiels que nous souhaitons souligner à l'issue de ce travail :

- nous retenons le développement, au second chapitre, d'une nouvelle approche de la notion de mission et sa mise en application au cas du ferroviaire, en particulier dans le contexte des chaînes de traction hybrides. Nous avons ainsi introduit un triplet d'indicateurs traduisant la capacité d'une mission à être hybridée : la « taille de la mission », illustrée par la puissance crête consommée, le « potentiel d'hybridation de puissance » traduisant l'écart relatif entre puissances moyenne et crête, tandis que le potentiel d'hybridation énergétique témoignait de la notion d'intermittence, notamment à travers l'énergie maximale utile à stocker pondérée par la taille de la mission. Nous avons mis en exergue la valeur informationnelle du triplet taille de la mission – potentiel d'hybridation de puissance – potentiel d'hybridation énergétique qui permet de faire une classification des missions selon leur degré de sévérité, voire de regrouper les missions de nature comparable en segments ou clusters. Concrètement, ce triplet d'indicateur nous a conduit à réduire le nombre de mission en dégageant la « dominance » des unes par rapport aux autres : la conception systémique a donc opéré sur un nombre réduit de missions dominantes. Dans ce travail, nous nous sommes limités à concaténer, pour chaque segment (triage, desserte, ...), les missions considérées comme dimensionnantes ou « dominantes », ce qui n'est certes pas optimal dans un contexte systémique où la compacité de la mission est essentielle en raison du coût de calcul. Une première perspective à cette thèse consisterait ainsi à prolonger cette idée par une approche type « fusion-réduction » des missions consistant à définir une mission unique multi-segments, véritable « PGCD intelligent » de l'ensemble des possibilités : « ne pourrait on pas isoler, au sein même d'une mission dimensionnante,

certains intervalles eux-mêmes critiques en terme de dimensionnement énergétique, ceci de façon à compacter l'horizon temporel significatif ? » Concrètement, les questions de segmentation de mission constituent une des cibles privilégiées dans le projet PLATHEE. De façon plus générale, cette notion de finalité (mission), essentielle au processus de conception systémique, fait partie intégrante de la feuille de route de notre Groupe de recherche. Les idées apportées dans cette thèse contribuent à cet objectif en complétant différentes pistes méthodologiques orientées vers le traitement du signal et de la statistique.

- nous retenons aussi la stratégie de gestion à double hybridation (accumulateur et supercondensateur). Par rapport à une « hybridation simple » et classique d'une source d'énergie par un composant de stockage, la richesse de ce cahier des charges nous a amené à reposer les questions de la gestion énergétique et à les reformuler en terme de partage, selon l'axe fréquentiel, des missions de chaque composant. Dans une telle architecture distribuée, les fonctions source de tension et sources de courant sont assignées par un gestionnaire global agissant au niveau système et au mieux attribuées aux composants selon leur état de charge et de fonctionnement. Quantitativement, les résultats de cette structure à double hybridation montrent que l'intérêt des supercondensateurs se situe essentiellement dans la préservation de la durée de vie des batteries plus que par un apport énergétique. A noter que ce résultat n'est vrai pour les missions considérées ici, d'autres études ayant montré l'intérêt énergétique d'un stockage supercapacitif pour des missions plus intermittentes, à potentiel d'hybridation énergétique plus élevé.
- grâce à la richesse du cas d'étude LHyDIE, le processus de conception systémique s'est ici « déroulé » de façon exhaustive, issu de la démarche séquentielle pour se conclure par une approche de conception simultanée, basée sur un outil d'optimisation multicritère. Pour la première des deux démarches, la synthèse systémique a permis de guider efficacement les choix de conception en réduisant le champ des possibles (puissance du groupe diesel, nombre de cellules batteries et de supercondensateurs), en terme de dimensions admissibles vis-à-vis du cahier des charges (encombrement, ...) et selon la mission considérée. Cette phase de synthèse, développée au chapitre trois fut complétée par un chapitre sur l'analyse systémique qui a permis d'extraire, parmi les solutions possibles, celles qui paraissaient les plus pertinentes vis-à-vis d'un ensemble de critères tels que coût d'investissement, durée de vie des composants et consommation de fuel. Cette analyse a notamment guidé le choix du dimensionnement proposé à la SNCF pour équiper la locomotive LHyDIE. Au-delà de l'affinage des solutions proposées, l'analyse énergétique développée au chapitre quatre puis l'analyse des performances dynamiques associée aux questions de contrôle commande et de gestion tel que présenté au chapitre cinq ont permis de valider les solutions proposées par la conception séquentielle. Enfin, le dernier chapitre consacré à la conception simultanée par optimisation ne fait qu'illustrer l'apport et le potentiel de cette démarche plus riche car témoignant des interactions entre les questions d'architecture, de gestion et de dimensionnement, significative des couplages inter paramétriques, inter critères ou contraintes. Cette démarche systémique globale permet de coupler simultanément un

ensemble complet et cohérent de multiples points de vue parmi lesquels différents critères sont agrégés sous la forme d'un « coût financier » associé à l'impact climatique. Signalons toutefois que la grande difficulté et peut être la « faiblesse actuelle » de cette démarche se situe dans la complexité de disposer d'indicateurs (critères, contraintes) pertinents sur un ensemble très complet de points de vue technico économiques : « difficile de quantifier la durée de vie d'un accumulateur Nickel Cadmium selon son cyclage ou d'être précis sur le volume d'un groupe diesel selon son dimensionnement en puissance ; difficile aussi de prévoir les coûts d'investissement et d'usage liés à la consommation de fuel, ceci alors que le baril de pétrole a quadruplé en quatre ans... Encore plus délicat de quantifier le « coût climatique » lié au rejet en émissions polluantes. Ceci étant, et malgré toute la complexité de disposer d'indicateurs quantitativement pertinents, il nous semble primordial de progresser qualitativement sur la mise en place et l'exploitation de tels outils de conception simultanée capables de dégager des tendances liées au contexte technico économique du moment ou de dégager des projections selon les tendances pressenties.

- Nous retenons également la richesse de cette étude en terme de nombre, de type et de niveaux de granularité de modèles, chacun étant dédié à un objectif de conception précis : « un modèle pourquoi faire » fut donc une de nos préoccupations majeures. La synthèse systémique et l'analyse statique fut ainsi basé sur un modèle en flux de puissance qui, bien qu'assez peu raffiné, est particulièrement efficace en coût de calcul tout en restant pertinent. L'analyse systémique a été complétée par un modèle électrique statique moyen qui a guidé le dimensionnement et la modularité (série, parallèle) des éléments de stockage. Un modèle dynamique moyenné à l'échelle de la fréquence de commutation des convertisseurs nous a permis de développer les lois de contrôle commande et de gestion d'énergie en temps réel. Enfin, le modèle électrique instantané, de niveau de granularité le plus fin, a permis de valider les dimensions de certains composants passifs de filtrage. Cette panoplie déjà complète de modèles fut encore complétée, au dernier chapitre, par un ensemble de modèles dédiés à l'optimisation.

Cette étude sur la conception d'une locomotive hybride fut donc particulièrement riche d'enseignements, tant sur le plan de la démarche systémique que des retombées applicatives : elle permet notamment d'avoir une vision plus claire des choix comparatifs en terme de nouvelles technologies. Dans le cadre du projet PLATHEE, au-delà de l'extension de l'hybridation ferroviaire à de nouveaux segments (transports omnibus et dessertes régionales, TGV, trains partiellement autonomes, tram-train, ...), l'offre technologique s'étend vers d'autres constituants tels que les volants d'inertie ou les groupes de génération électrique propre à pile à combustible.

Annexe A

Base de données des missions ferroviaires

A.1 Profils de lignes

Les figures A.1a et A.1b représentent deux profils de ligne et de vitesse maximale.

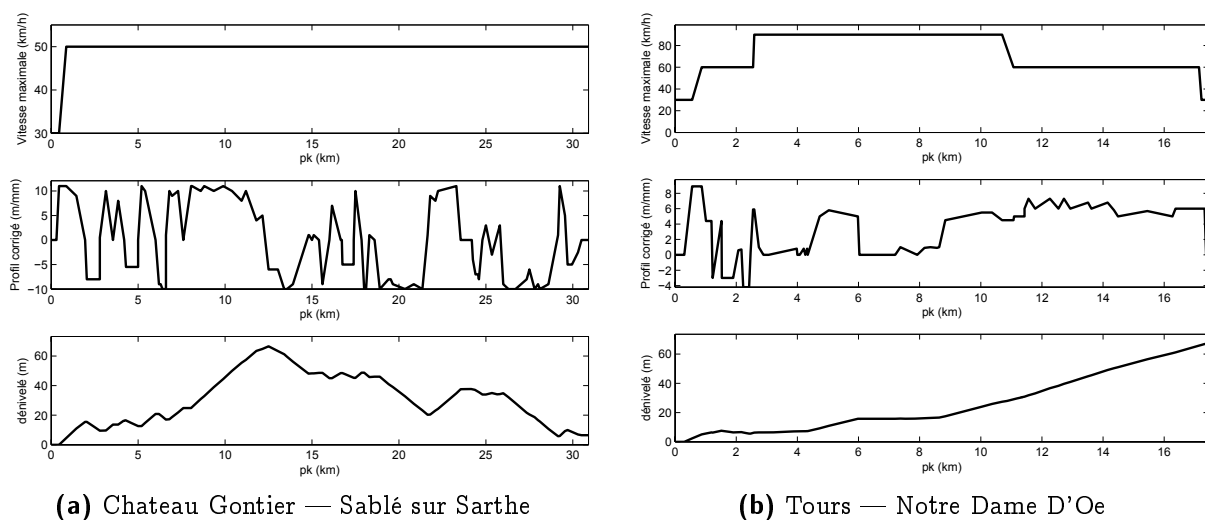


Fig. A.1: Deux exemples de profils de ligne et de vitesse maximale

A.2 Missions de triage et de manœuvre

Les figures A.2a à A.4d représentent les missions de triage, de manœuvre et de desserte locale du cahier des charges du démonstrateur LHyDIE.

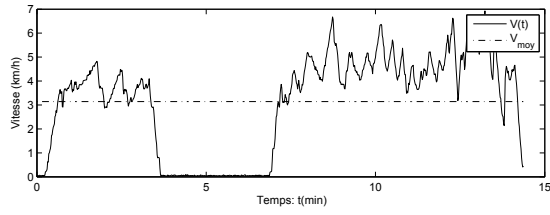
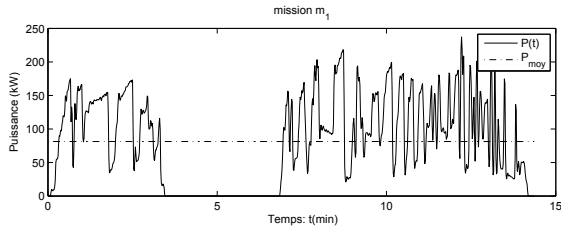
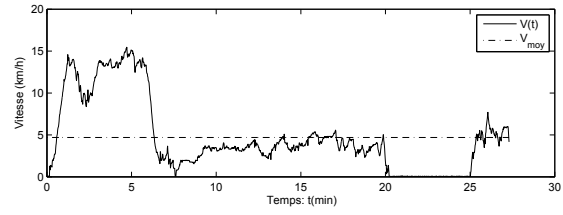
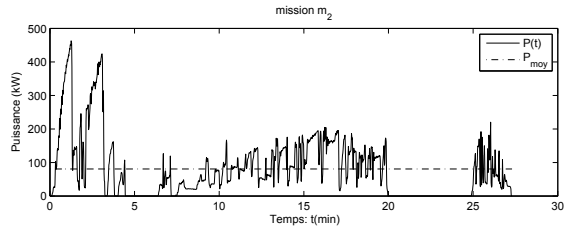
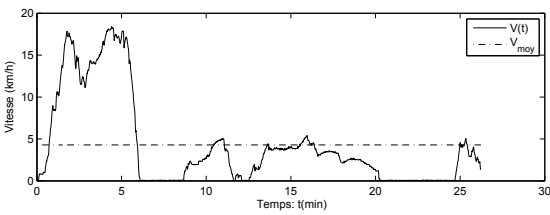
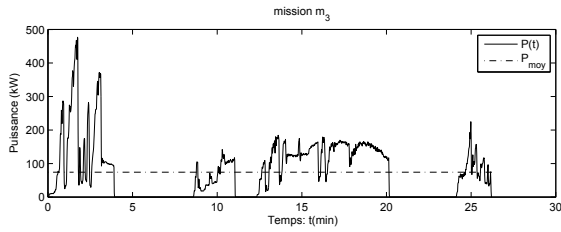
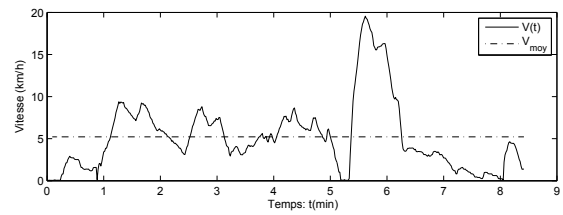
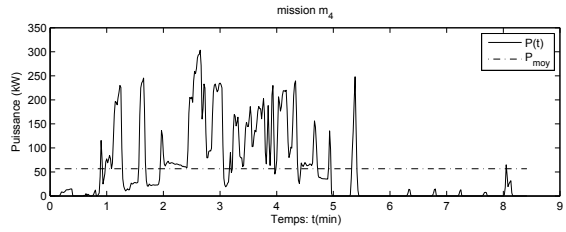
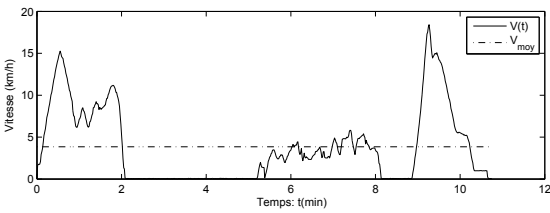
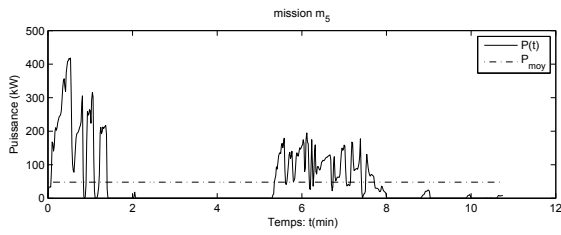
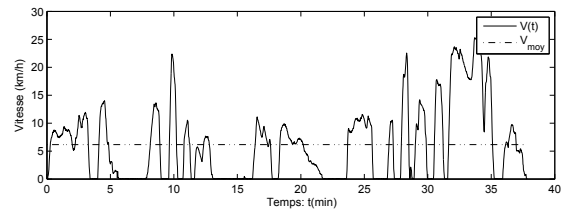
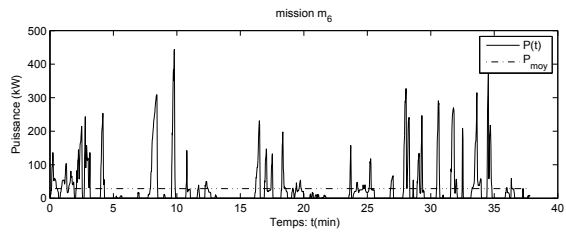
(a) m_1 (triage ou manœuvre)(b) m_2 (triage ou manœuvre)(c) m_3 (triage ou manœuvre)(d) m_4 (triage ou manœuvre)(e) m_5 (triage ou manœuvre)(f) m_6 (triage ou manœuvre)

Fig. A.2: Missions de triage, de manoeuvre et de desserte locale

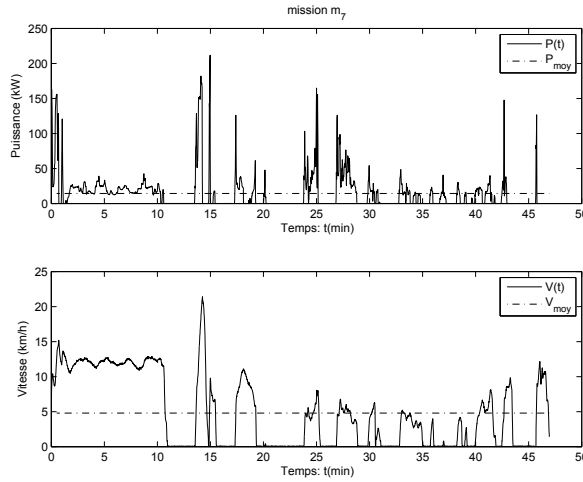
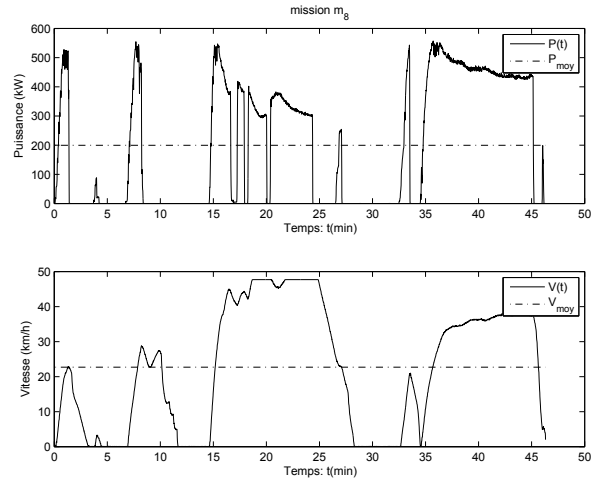
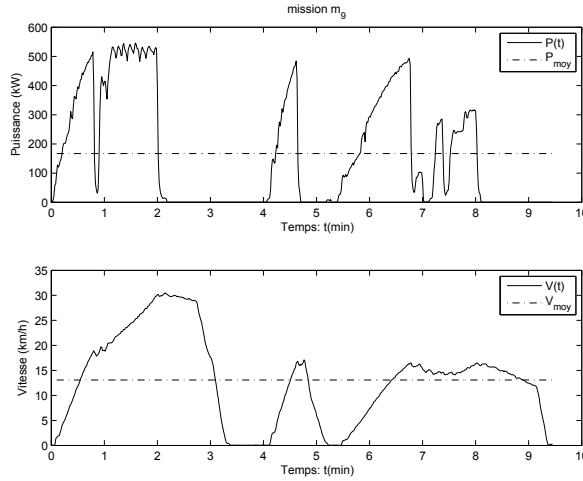
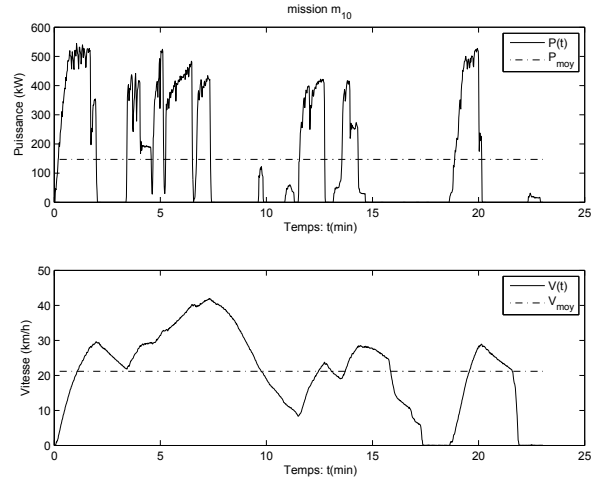
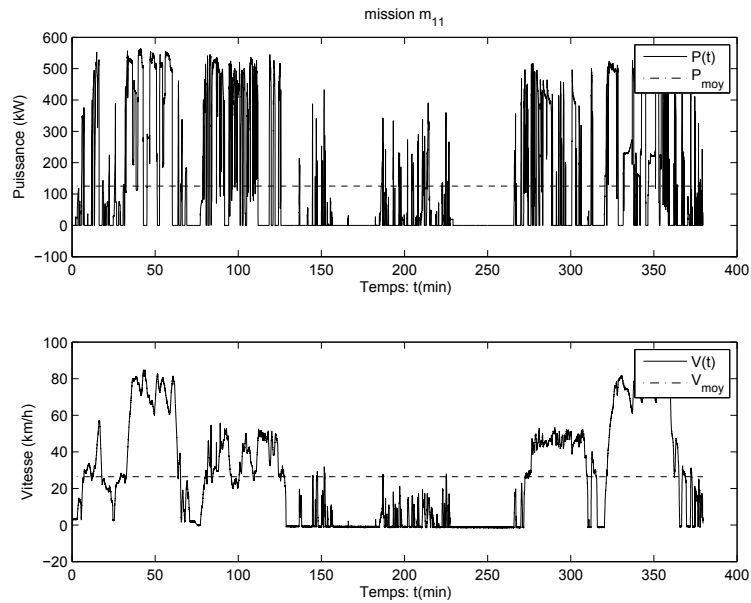
(a) m_7 (trriage ou manoeuvre)(b) m_8 (desserte locale)(c) m_9 (desserte locale)(d) m_{10} (desserte locale)(e) m_{11} (desserte locale)

Fig. A.3: Missions de triage, de manoeuvre et de desserte locale

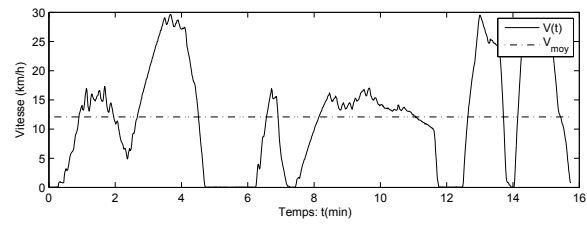
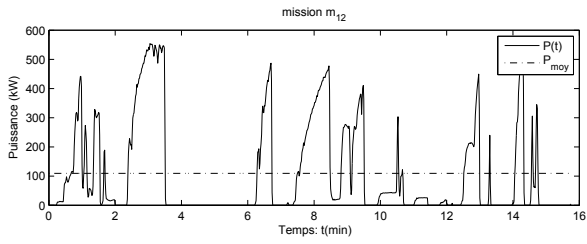
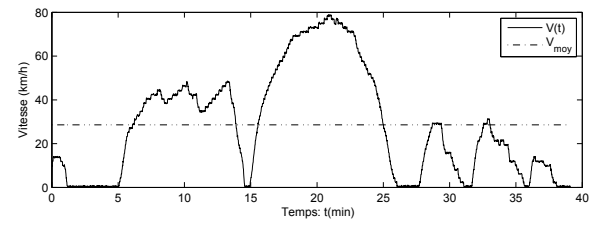
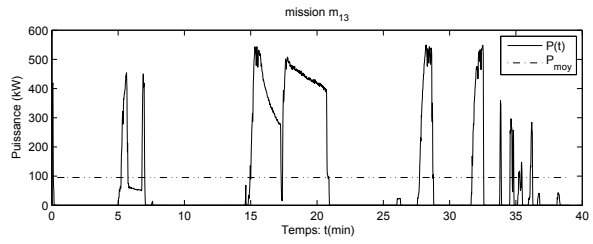
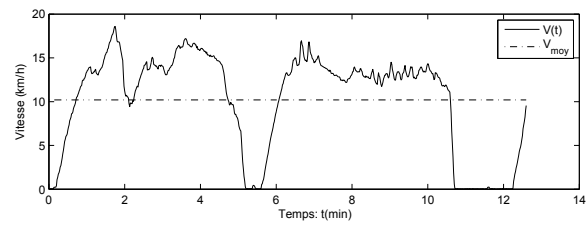
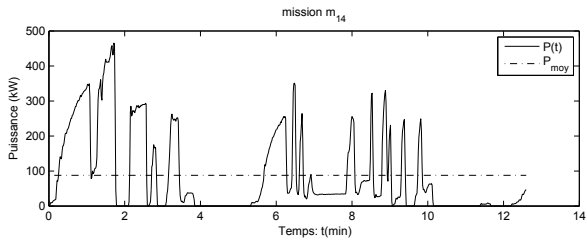
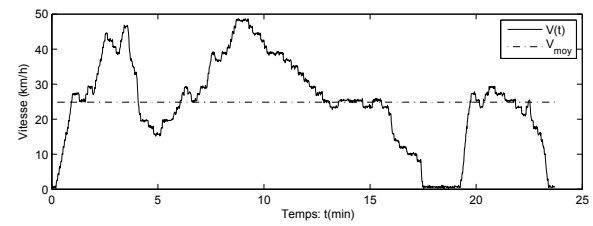
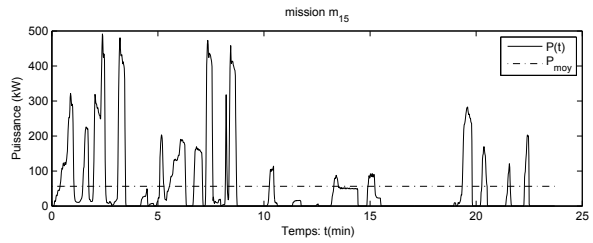
(a) m_{12} (desserte locale)(b) m_{13} (desserte locale)(c) m_{14} (desserte locale)(d) m_{15} (desserte locale)

Fig. A.4: Missions de triage, de manoeuvre et de desserte locale

A.3 Mission de transport urbain en omnibus Lille-Valenciennes

Les figures A.5 est une mission de transport urbain en omnibus Lille-Valenciennes. Cette mission ne fait pas partie du cahier des charges de LHyDIE.

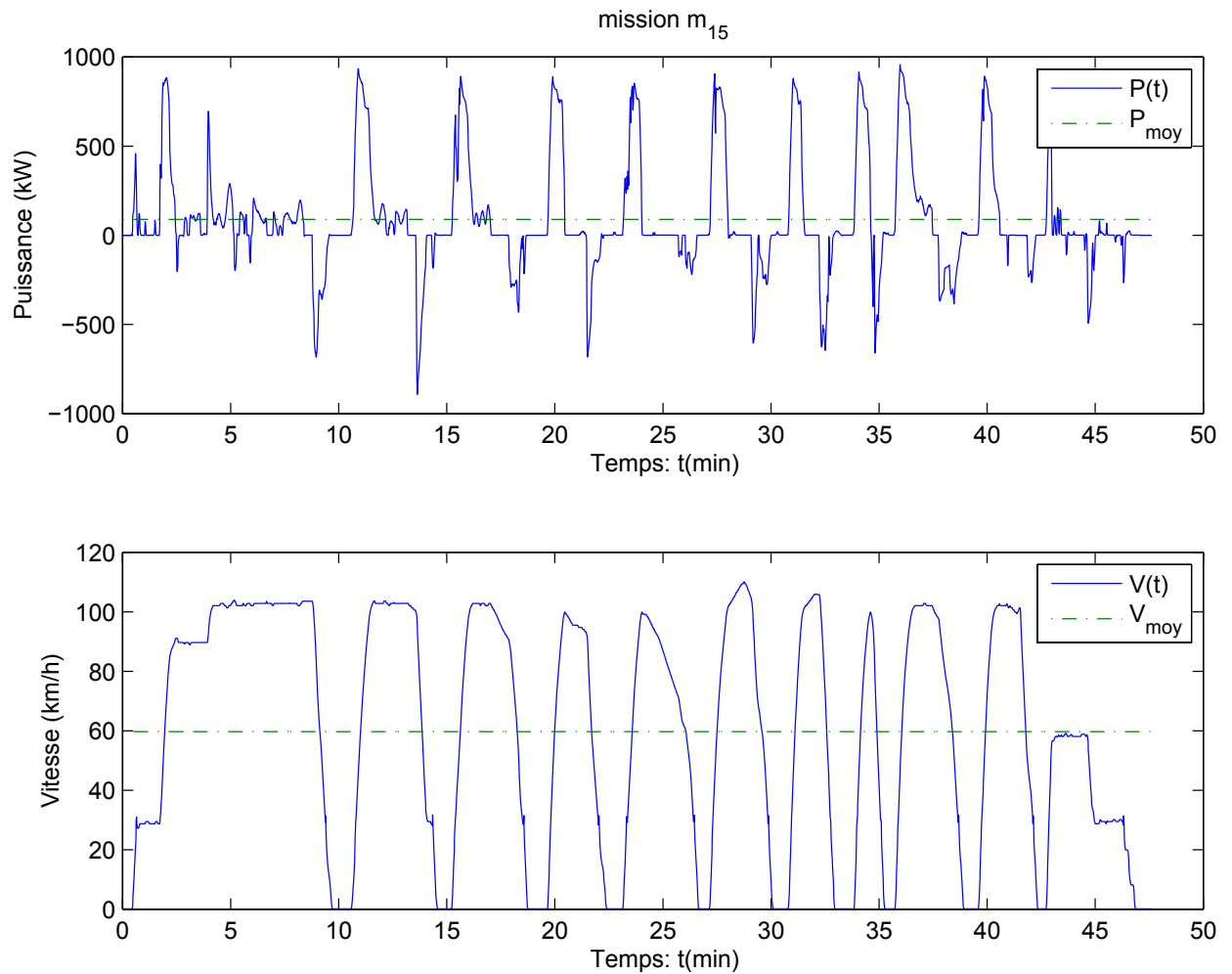


Fig. A.5: Mission de transport urbain en omnibus Lille-Valenciennes

Annexe B

Algorithmes relatifs aux calculs sur l'énergie et la puissance

B.1 Intégration saturée

Soit $b(t)$ une mission de puissance (fonction continue du temps) de durée d et $E(t)$ l'intégrale saturée de b . Nous notons, en tenant compte de la convention de signe utilisée dans ce mémoire⁽¹⁾ :

$$\forall t \in [0 \dots d] \quad E(t) = - \int_{0 \text{ sat}}^t b(\tau) d\tau \quad (\text{B.1})$$

Soient $b(n)_{n=0..N}$ et $E(n)_{n=0..N}$, avec $d = N \cdot T_s$, les versions échantillonnées respectives de $b(t)$ et $E(t)$, et T_s la période d'échantillonnage. Nous pouvons écrire :

$$\forall n = 0..N, \quad b(n) = b(n \cdot T_s) \quad \text{et} \quad E(n) = E(n \cdot T_s) \quad (\text{B.2})$$

A chaque instant $t = n \cdot T_s$, nous définissons la quantité d'énergie $\delta e(n)$ échangée entre l'instant $t = (n-1) \cdot T_s$ et l'instant $t = n \cdot T_s$ par :

$$\begin{cases} e(0) & = 0 \\ \forall n = 1..N, \quad \delta e(n) & = -\frac{1}{2} T_s (b(n-1) + b(n)) \end{cases} \quad (\text{B.3})$$

L'intégrale saturée $E(t)$ de la mission de puissance $b(t)$ est définie par la suite par :

$$\begin{cases} E(0) & = 0 \\ \forall n = 1..N, \quad E(n) & = \begin{cases} 0 & (\text{cas 1) si } E(n-1) + \delta e(n) \geq 0 \\ E(n-1) + \delta e(n) & (\text{cas 2) sinon} \end{cases} \end{cases} \quad (\text{B.4})$$

⁽¹⁾Convention générateur : décharge positive, charge négative.

En effet, par définition, $\forall n \ E(n) \leq 0^{(1)}$. Lorsque $\delta e(n)$ est strictement négatif (puissance à fournir), comme $E(n-1)$ est nécessairement négatif ou nul la somme $E(n-1) + \delta e(n)$ est alors strictement négative ou nulle. Par conséquent l'énergie $\delta e(n)$ est fournie (cas 2). Par contre, lorsque $\delta e(n)$ est positif (puissance à stocker), elle n'est effectivement stockée que si elle ne provoque pas le débordement du niveau d'énergie par rapport au niveau initial $E(0) = 0$.

B.2 Calcul de l'énergie utile par intégration saturée (CEUPIS)

Le processus **CEUPIS** est une fonction qui associe à une mission de puissance $b(t)$, l'énergie utile définie à partir de l'intégration saturée par :

$$Eu_{BT} = \max_{n=1..N} E(n) - \min_{n=1..N} E(n) \quad (B.5)$$

où $E(n)$ est l'intégrale saturée de $b(t)$ (cf. §B.1). Le processus **CEUPIS** retourne la capacité totale de stockage :

$$CEUPIS(b(t)) = \frac{Eu_{BT}}{DoD_{BT}} \quad (B.6)$$

B.3 Recherche dichotomique du dimensionnement optimal (RDDO)

Le processus **RDDO** intervient dans une situation spécifique résumée à la figure B.1. *Au point A la capacité de stockage E_A n'est pas suffisante car elle correspond à une puissance de charge beaucoup plus élevée (en valeur absolue) qu'elle ne peut admettre. Au point B, la capacité de stockage E_B est suffisante mais pas nécessaire.* De fait, il est certain que le point de dimensionnement optimal X se situe entre les points A et B. La caractéristique du point X est la suivante : *Lorsque les phases de charge de la mission sont écrêtées à P_X , la capacité totale E_X est telle que le point X de coordonnées (P_X, E_X) se situe dans la zone de validité au plus près de la ligne frontalière.* Le processus **RDDO** permet d'approcher le point le point X. La figure B.1 illustre aussi l'évolution de la capacité totale de stockage $Etot_{BT}$ en fonction de la puissance limite de charge P_{ch} . Remarquons que le point X est le point d'intersection des besoins énergétiques — illustrés par la fonction $Etot_{BT}(P_{ch})$ — et des limites technologies des batteries.

Le processus **RDDO** reçoit en entrée, les points $A(P_A, E_A)$ et $B(P_B, E_B)$. Il définit ensuite un intervalle de puissance de charge $[P_{left}, P_{right}]$ contenant le point P_X .

$$\begin{aligned} P_{left} &= P_A \\ P_{right} &= P_B \end{aligned} \quad (B.7)$$

A chaque itération, le processus estime, pour la limitation en puissance de charge P_{center} (milieu de P_{left} et P_{right}), le besoin en capacité de stockage équivalent E_{center} . L'opération :

$$P_{COR} = COR(P_{BT}^{rel}, P_{center}) \quad (B.8)$$

⁽¹⁾Démontrable par récurrence : $E(0) = 0$ et $\forall n \ E(n)$ est soit nul ou égal à $E(n-1) + \delta e(n)$ seulement si ce dernier est négatif.

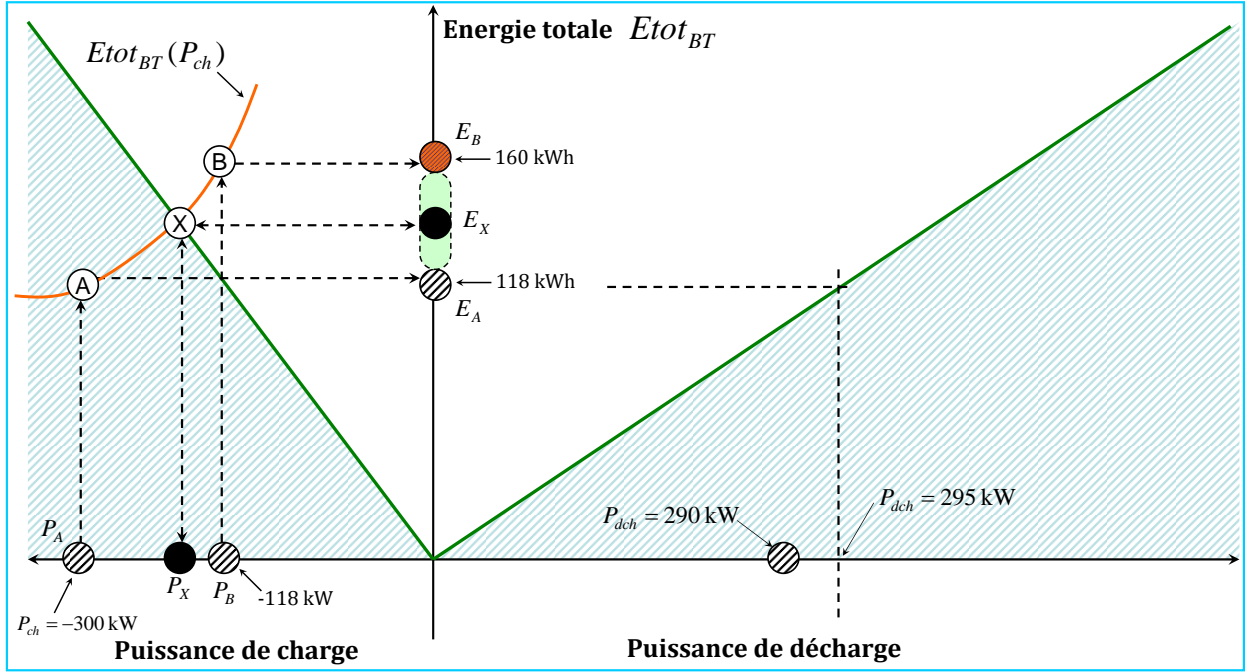


Fig. B.1: Recherche du dimensionnement optimal

applique la limitation de la puissance de charge P_{center} à la mission P_{BT}^{rel} . Puis l'opération :

$$E_{center} = CEUPIS(P_{COR}) \quad (B.9)$$

calcule la capacité de stockage correspondant à la mission corrigée. Tant que le critère d'arrêt :

$$|E_{center} - \mu_{ch} \cdot P_{center}| \leq \varepsilon \quad (B.10)$$

signifiant que le point P_{center} est suffisamment proche de P_X n'est pas satisfait, l'intervalle $[P_{left}, P_{right}]$ est réduit de moitié et le processus recommence.

A la fin du processus nous posons :

$$\begin{aligned} P_X &= P_{center} \\ E_X &= E_{center} \end{aligned} \quad (B.11)$$

Pour éviter tout risque de bouclage à l'infini, consécutif à une impossibilité de convergence, on peut ajouter au processus un compteur qui arrête ce dernier lorsqu'un grand nombre d'interactions se produisent sans convergence. E_B .

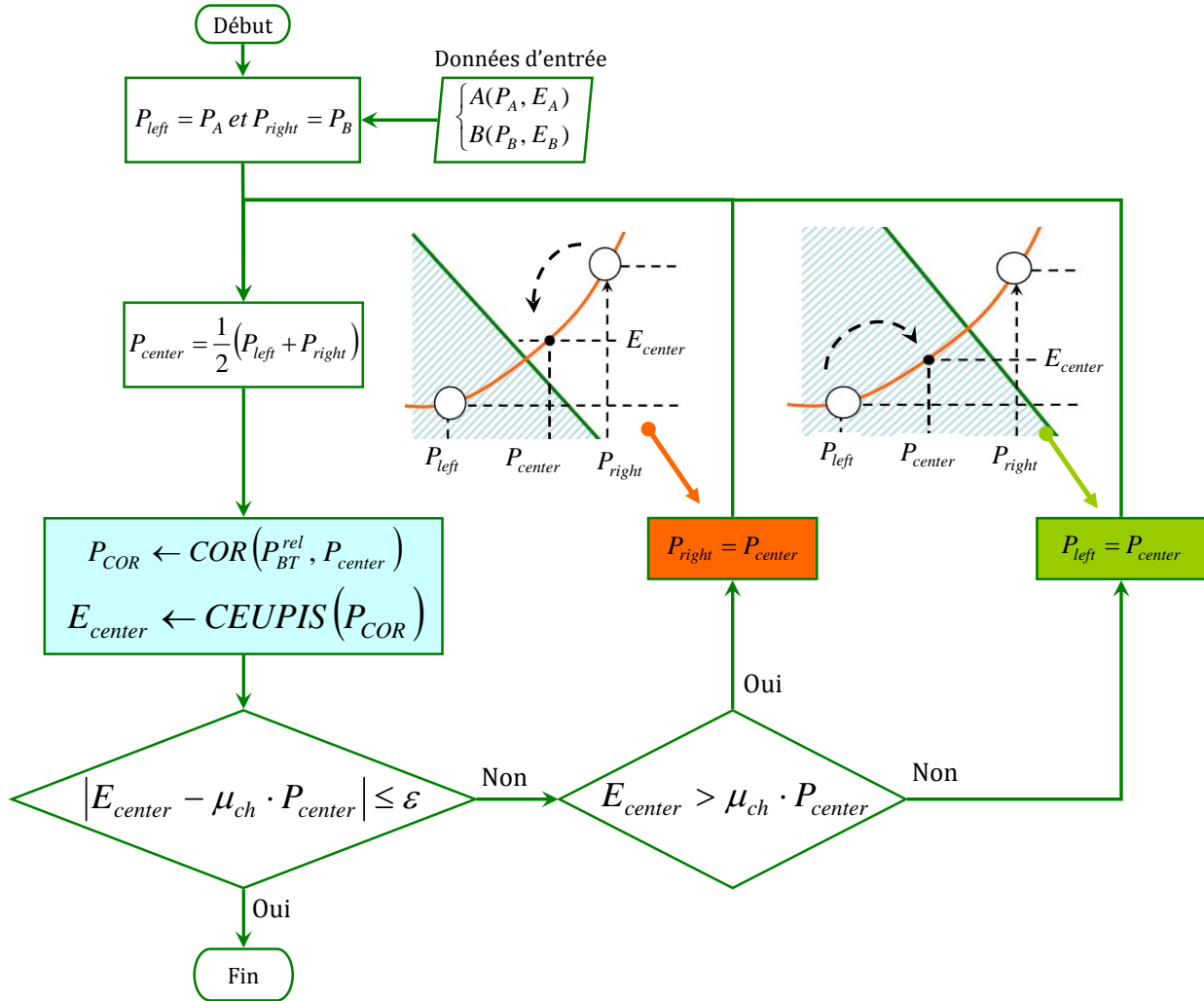


Fig. B.2: Algorithme du processus RDDO

Annexe C

Bases de données des caractéristiques des sources d'énergie étudiées

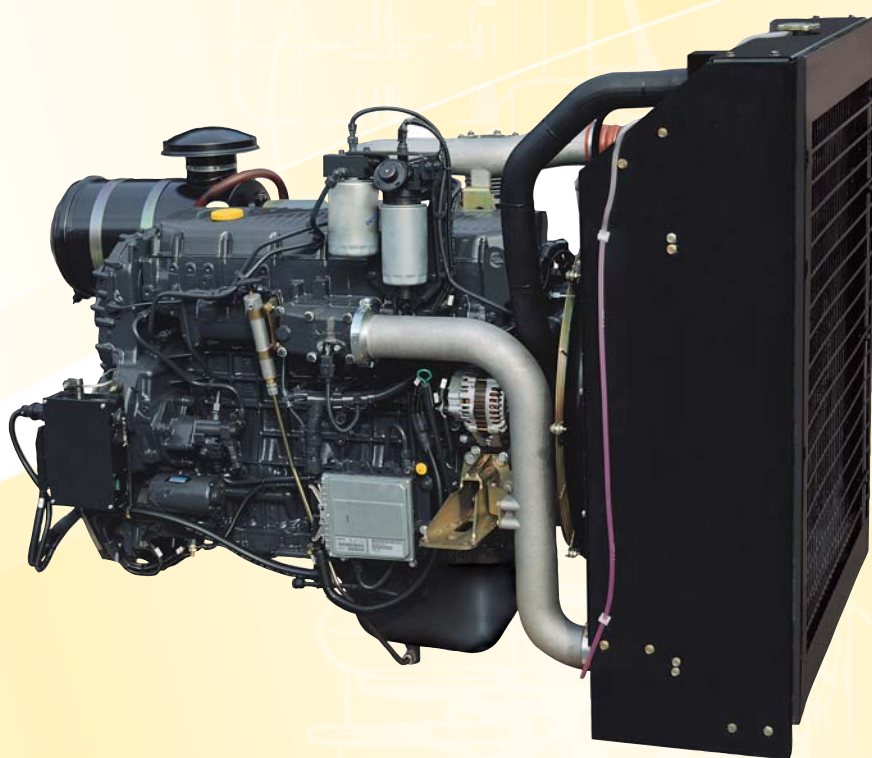
C.1 Fiche technique du groupe Diesel utilisé sur LHyDIE

C78 TE2S

236 kW@1500 tr/mn

253 kW@1800 tr/mn

EN 2002/88/EC



**MOTEUR POUR
LES APPLICATIONS
POWER GENERATION**

C78 TE2S POUR LES APPLICATIONS POWER GENERATION

Caractéristiques techniques

Cycle thermodynamique		Diesel à 4 temps	
Alimentation en air		TAA	
Architecture		6, en ligne	
Alésage x Course	mm	115x125	
Cylindrée totale	l	7.8	
N.bre de soupapes par cylindre		4	
Système d'injection		Electronic Injector Unit	
Régulateur de tours		électronique	
Refroidissement		à liquide (eau + 50% Paraflu11)	
Carter couvre volant/volant	type	SAE1/14"	
Rotation volant		antohoraire	
Caractéristiques huile lubrifiante		ACEA E3-E5	
Consommation huile lubrifiante		<0.1% de consomm. combustible	
Caractéristiques du combustible		EN 590	
Intervalle de remplacement huile et filtres	heures	600	
Consumo combustible a:	tr/mn	1500	1800
	100% charge l/h (g/kWh)	51.0 (192.7)	57.0 (202.0)
	80% charge l/h (g/kWh)	40.0 (189.4)	45.0 (199.4)
	50% charge l/h (g/kWh)	26.0 (194.3)	29.0 (203.7)
Capacité liquide réfrigérant: seulement moteur	l	~15	
moteur+radiateur	l	~63	
ATB (sans capot)	°C	55	
Il n'est pas admis le déplacement du radiateur			
Capacité totale huile compris tuyaux, filtres, etc.	l	~28	
Système électrique		-	
Batterie de démarrage: capacité recommandée	Ah	2x185	
courant de décharge (EN 50342)	A	1200	
Démarrage à froid: sans pré-chauffage d'air	°C	-15	
avec pré-chauffage d'air	°C	-25	

Performances

Service ¹		1500 tr/mn		1800 tr/mn	
		PRIME	STAND-BY	PRIME	STAND-BY
Puissance nominale ²	kWm	215	236	230	253

1) Service selon ISO 8528- En cas d'utilisation à des températures supérieures à 40°C et/ou à plus de 1000 mètres, il est nécessaire d'appliquer un facteur de réduction de la puissance. Contacter l'organisation de vente FPT.

2) Puissances nettes au volant pouvant être obtenues après 50 heures de fonctionnement, avec une tolérance de ±3%.

PRIME POWER: La prime power est la puissance maximale disponible sous charges variables, pendant un nombre illimité d'heures. La puissance moyenne qui peut être prélevée au cours de 24 heures de fonctionnement ne doit pas être supérieure à 80% de la prime power déclarée entre les intervalles de maintenance prescrits et dans des conditions ambiantes standard. Une surcharge de 10% pendant 1 heure toutes les 12 heures de fonctionnement est admise.

STAND-BY POWER: La stand-by power est la puissance maximale disponible pendant 500 heures/an, avec un coefficient moyen de charge de 90% de la puissance stand-by déclarée. Aucune surcharge n'est admise pour cette utilisation.

CONTINUOUS POWER: Contacter l'organisation commerciale FPT.

C78 TE2S POUR LES APPLICATIONS POWER GENERATION

Etat de fourniture:

Moteur FPT C78 TE2S équipé de:

- Radiateur monté avec échangeur thermique air-air intégré
- Pompe d'extraction huile
- Protection avant du radiateur
- Ventilateur soufflant monté avec entraînement par courroie
- Grille de protection du ventilateur
- Filtre à air monté avec cartouches primaire et secondaire interchangeables
- Filtre à combustible
- Pré-filtre à combustible avec séparateur d'eau
- Filtre à huile interchangeable
- ECU de commande des injecteurs et gestion du moteur, avec câblage de connexion et capteurs
- Boîtier à relais avec terminaux de connexion.
- Supports avant de support moteur montés
- Carter couvre volant SAE3 et volant 11" 1/2
- Tubulure d'échappement orientable
- Blow-by avec recyclage
- Jauge de niveau d'huile
- Capteurs HWT et LOP
- Emetteurs WT et OP pour instruments
- Système électrique 24Vcc
- Documentation moteur

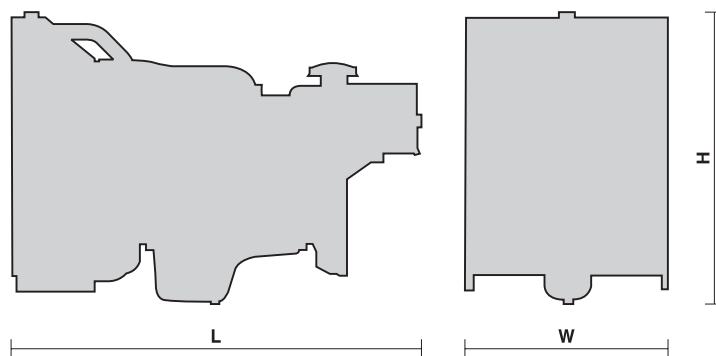
LE MOTEUR EST LIVRE SANS LIQUIDES

Options:

En option le moteur peut être équipé de:

- Résistance de pré-chauffage de l'eau à 120Vca ou 230Vca
- Emetteur de niveau d'eau insuffisant
- Protection du collecteur d'échappement et de la turbine
- Terminal d'échappement flexible

Dimensions:



L = 2107 mm

W = 1055 mm

H = 1480 mm

Poids à sec ~ 1030 kg

POINTS FORTS DU MOTEUR

- **PERFORMANCES:** Architecture fonctionnelle; température de démarrage à froid jusqu'à -15°C; performances obtenues sans dispositif EGR extérieur; puissance avant réduction jusqu'à 40°C et 1000 m d'altitude; prise de mouvement en classe G3 (ISO 8528-5); possibilité de commuter le même moteur de 1500 tr/mn à 1800 tr/mn.
- **EFFICACITE DU SERVICE:** Densité du réseau après-vente.
- **FIABILITE:** Garantie à vie pour les courroies Poly V.
- **REDUCTION DES COUTS D'EXPLOITATION:** Nouveaux intervalles de maintenance espacés à 600 h (remplacement huile et filtres); consommation réduite d'huile et de combustible; nouveau système de recyclage blow-by.
- **RESPECT DE L'ENVIRONNEMENT:** Réduction des émissions sonores; respect des normes en matière d'émissions gazeuses.
- **FLEXIBILITE DE CONFIGURATION:** Interface générateur standard SAE; gamme complète de moteurs.

FIAT POWERTRAIN TECHNOLOGIES
Via Puglia, 15 - 10156 Torino

FIAT POWERTRAIN TECHNOLOGIES
Viale dell'Industria, 15/17 - 20010 Pregnana Milanese (MI)

www.ftpowertrain.com

DISTRIBUTEUR LOCAL

C.2 Batteries

C.2.1 Caractéristiques de la batterie NiCd FNC 1502 HR

2- batterie 348Vcc Ni-Cd HOPP

- 1 batterie Hoppecke Ni-Cd 348Vcc équipée et assemblée, comprenant :
 - 290 éléments de type: **FNC 1502HR**
 - suivant CEI 60623 et NFF 64018
 - capacité nominale totale: **135 A/h à C₅ ; 20°C**
 - bacs des éléments en Polypropylène (pp)
 - performances en T°C : **-18°C à + 30°C**
 - courant de décharge nominal (I5) : **27A**
 - courant de charge recommandé : **40,5A**
 - tension nominale : **1,2V/élément**
 - tension de charge boost : **1,55 -1,57v/élément**
 - tension de floating : **1,45v -1,47v/élément**
 - résistance interne/élément : **0,262 mΩ**
 - éléments pleins et chargés
 - dimensions d'un élément : **115* 122* 309mm**
 - référence : **411 206 2212**
 - poids d'un élément : **7,05 Kg +/-3%**
 - quantité d'électrolyte/élément : **1,51 litre**
 - poids total/batterie : **2.150 Kg +/-5% (sans les tiroirs équipés)**
 - batterie remplie et chargée
 - fourniture des sondes de température (PT100) (2/tiroirs)
 - 10 « dummies » éléments en pp
 - Les bouchons de transport pour éléments FNC
 - les connecteurs isolés inter éléments (en Cu nickelé)
 - les calages dans les tiroirs batteries (en pp)
 - les séparateurs inter éléments (croix, T, L) en pp
 - Les accessoires pour le système centralisé de remplissage, comprenant:
 - 288 bouchons injector (réf : 414 400 0133)
 - 12 bouchons end injector (réf : 414 400 0134)
 - 60m Tube plastic circulation d'eau (réf : 414 400 0135)
 - 576 Pincettes de serrage tube (réf : 414 400 0136)
 - 96 connexion d'angle tube (réf : 414 400 0172)
 - 1 Contrôle de flux (réf : 414 400 0137)
 - 12 coupleur remplisseur (réf : 414 400 0141)
- Prix unitaire par batterie
 - **66.200,00 € HT/ batterie**

HOPPECKE Batterie Systeme GmbH

Rechtsform:
Gesellschaft mit beschränkter Haftung
Sitz Brilon · Amtsgericht Arnsberg HRB 3602

DIN EN ISO 14001 · DIN EN ISO 9001 : 2000

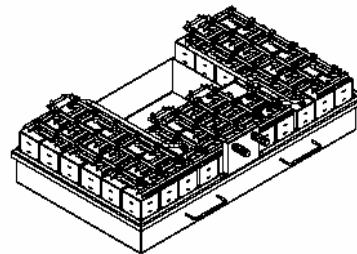
UIDNR: DE124278855 · Gerichtsstand ist Brilon· Erfüllungsort für Lieferungen und Zahlungen ist Brilon

Geschäftsführer:
Dr. Marc Zoellner
Dr. Gunter SchädlichBankverbindung:
Landesbank Baden-Württemberg, Stuttgart
BLZ 600 501 01 · Konto-Nr. 13 837 95
BIC/SWIFT: SOLA DE ST
IBAN: DE52600501010001383795Commerzbank AG, Zwickau
BLZ 870 400 00 · Konto-Nr. 256 230 400
BIC/SWIFT: COBA DE FF XXX
IBAN: DE02870400000256230400

905,5

792

64



area for electrical parts
(fuse, plug,...)

[illegible]

Commerzbank AG, Zwickau
BLZ 870 400 00 . Konto-Nr. 256 230 400
BIC/SWIFT: COBA DE FF XXX
IBAN: DE02870400000256230400

Technical drawings and tables for HOPPECKE FNC-Zellen.

Side View 1 (Left): Dimensions: 305 ± 1 mm (height), 122 ± 0.5 mm (width), 135 ± 0.5 mm (depth).

Side View 2 (Right): Dimensions: 305 ± 1 mm (height), 115 ± 0.5 mm (width), 135 ± 0.5 mm (depth).

Top View: Dimensions: 71 ± 0.1 mm (width).

Tables:

Zellen in dieser Größe		Zellen in dieser Größe	
Typ	Teilenummer	Typ	Teilenummer
FNC - Stationär		FNC - Rail	
FNC 117 X	411 207 3218	FNC 1172 XR	411 208 3218
FNC 115 F	411 207 3210	FNC 1302 HR	411 208 3210
FNC 125 F	411 207 3211	FNC 1402 HR	411 208 3211
FNC 135 F	411 207 3212	FNC 1502 HR	411 208 3212
FNC 150 F	411 207 3208	FNC 200 PR	411 208 3208
FNC 130 F	411 207 3209	FNC 290 PR	411 208 3209
⊙ FNC 209 L	411 207 4208	FNC 170 MRE	411 246 3208
⊙ FNC 209 L	411 207 4209	FNC 198 MRE	411 246 3209
FNC 175 L	411 247 4208	FNC 322 LR	411 208 4208
FNC 198 L	411 247 4209	FNC 747 LR	411 208 4209
FNC - Droppelst			
FNC 2043 X	411 207 3259		
FNC - Traction			
FNC T 218 X	411 208 3218		
FNC T 210 F	411 208 3210		
FNC-T 211 F	411 208 3211		
FNC-T 208 M	411 208 3208		
FNC T 290 M	411 208 3209		

Ⓢ Verwendung nur für bereits existierende Projekte.
Use only for projects already existing.

Commerzbank AG, Zwickau
BLZ 870 400 00 . Konto-Nr. 256 230 400
BIC/SWIFT: COBA DE FF XXX
IBAN: DE02870400000256230400

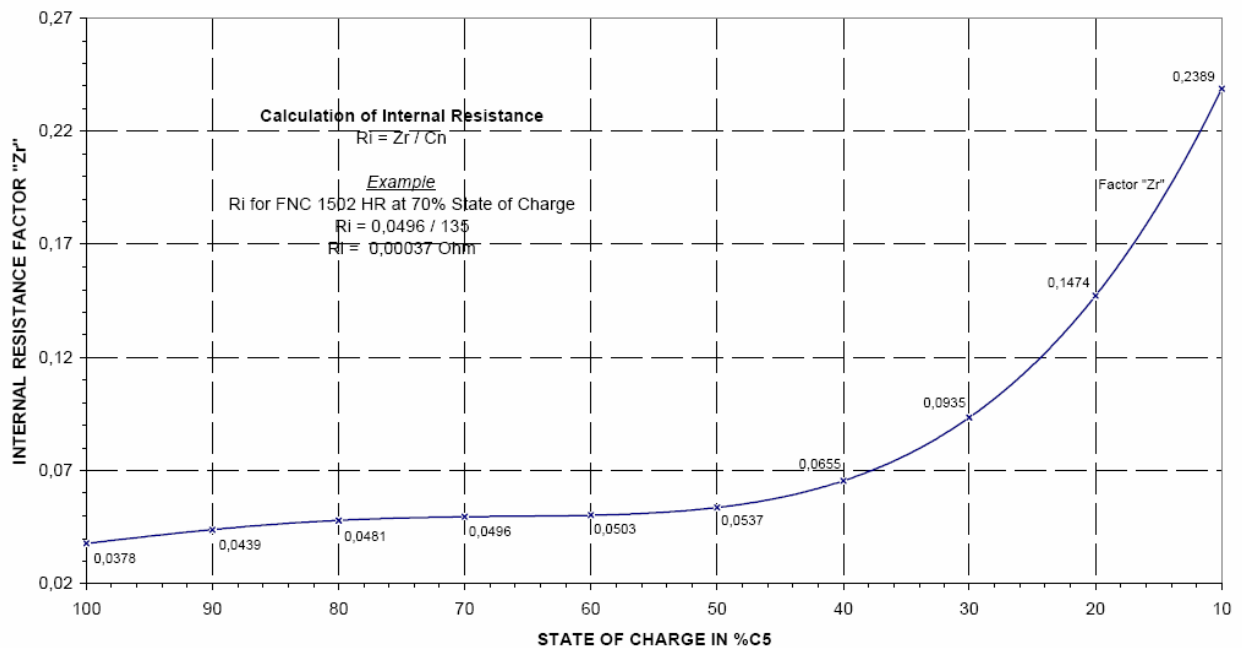
Evolution de la *résistance interne de l'élément Ni-Cd FNC 1502HR* en fonction de l'état de charge (%):

Application Engineering



FACTOR FOR CALCULATING INTERNAL RESISTANCE

FNC H-Type Cells at 20°C

FNC H resistance P20.xls
Resistance FNC H-Type

NAT / Ba

HOPPECKE Batterie Systeme GmbH

Rechtsform:
Gesellschaft mit beschränkter Haftung
Sitz Brilon · Amtsgericht Arnsberg HRB 3602

DIN EN ISO 14001 · DIN EN ISO 9001 : 2000

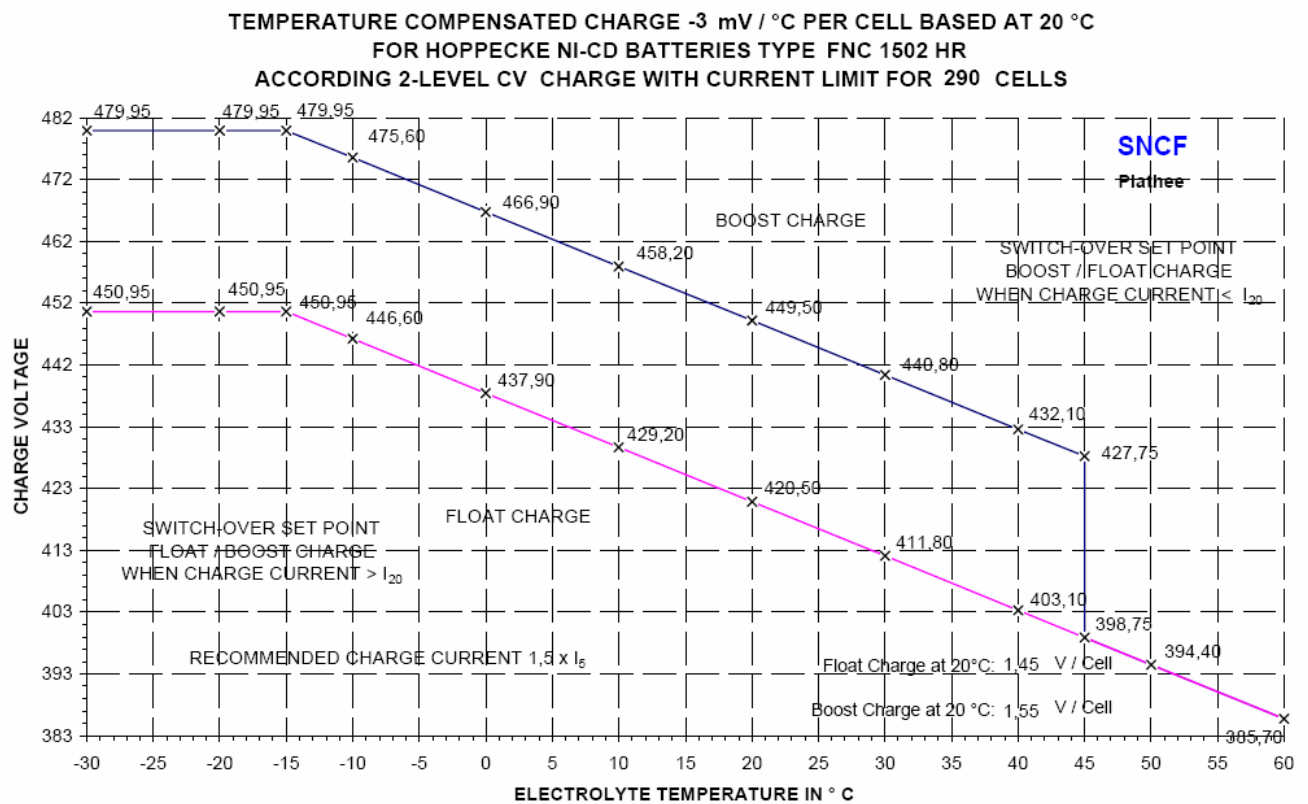
UIDNR: DE124278855 · Gerichtsstand ist Brilon· Erfüllungsort für Lieferungen und Zahlungen ist Brilon

Geschäftsführer:
Dr. Marc Zoellner
Dr. Gunter SchädlichBankverbindung:
Landesbank Baden-Württemberg, Stuttgart
BLZ 600 501 01 · Konto-Nr. 13 837 95
BIC/SWIFT: SOLA DE ST
IBAN: DE52600501010001383795Commerzbank AG, Zwickau
BLZ 870 400 00 · Konto-Nr. 256 230 400
BIC/SWIFT: COBA DE FF XXX
IBAN: DE02870400000256230400

Courbe de charge à compensation de température (à +20°C) pour la batterie composée de 290 éléments Ni-Cd FNC 1502HR :

La valeur de la tension max est de : 479,95 V

Application Engineering

spsh-f102407-sncf-plathee-drive-fnc-rev002.xls
Charge Diagram

13.07.2007

Railway Department
NAT / Ba

HOPPECKE Batterie Systeme GmbH

Rechtsform:
Gesellschaft mit beschränkter Haftung
Sitz Brilon · Amtsgericht Arnsberg HRB 3602

DIN EN ISO 14001 · DIN EN ISO 9001 : 2000

UIDNR: DE124278855 · Gerichtsstand ist Brilon· Erfüllungsort für Lieferungen und Zahlungen ist Brilon

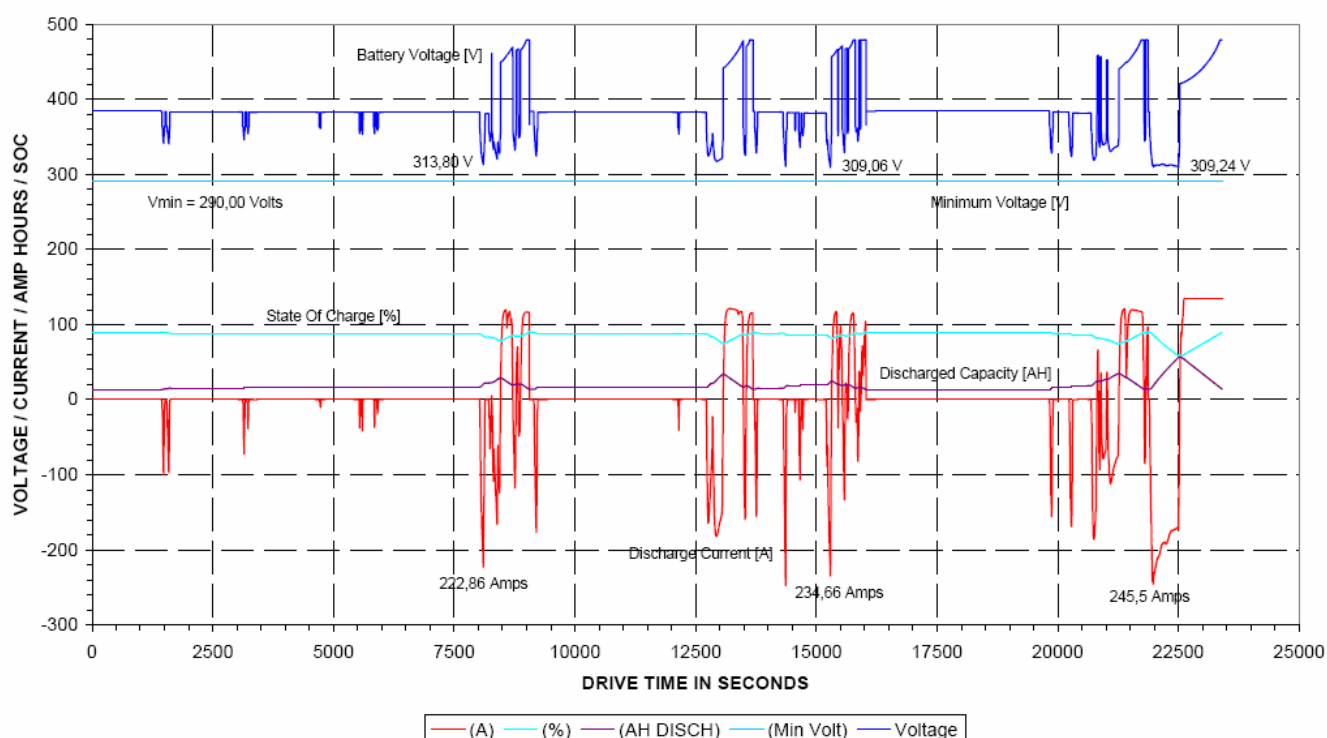
Geschäftsführer:
Dr. Marc Zoellner
Dr. Gunter SchädlichBankverbindung:
Landesbank Baden-Württemberg, Stuttgart
BLZ 600 501 01 · Konto-Nr. 13 837 95
BIC/SWIFT: SOLA DE ST
IBAN: DE52600501010001383795Commerzbank AG, Zwickau
BLZ 870 400 00 · Konto-Nr. 256 230 400
BIC/SWIFT: COBA DE FF XXX
IBAN: DE02870400000256230400

Simulation du *profile de décharge* donné pour une température de décharge à : *-18°C*, avec un coefficient « derating » de -10% (état de charge) pour la batterie composée de : *290 éléments Ni-Cd FNC 1502HR* :

Application Engineering



DRIVE PROFILE SIMULATION FOR NI-CD BATTERY WITH 10% DERATING FOR SOC
290 CELLS FNC 1502 HR (135AH) AT THE TEMPERATURE OF -18°C

app-f102407-sncf-plathee-drive-fnc-rev002.xls
Chart FNC H-Type

13.07.2007

Railway Department
NAT / Ba

HOPPECKE Batterie Systeme GmbH

Rechtsform:
Gesellschaft mit beschränkter Haftung
Sitz Brilon · Amtsgericht Arnsberg HRB 3602

DIN EN ISO 14001 · DIN EN ISO 9001 : 2000

UIDNR: DE124278855 · Gerichtsstand ist Brilon· Erfüllungsort für Lieferungen und Zahlungen ist Brilon

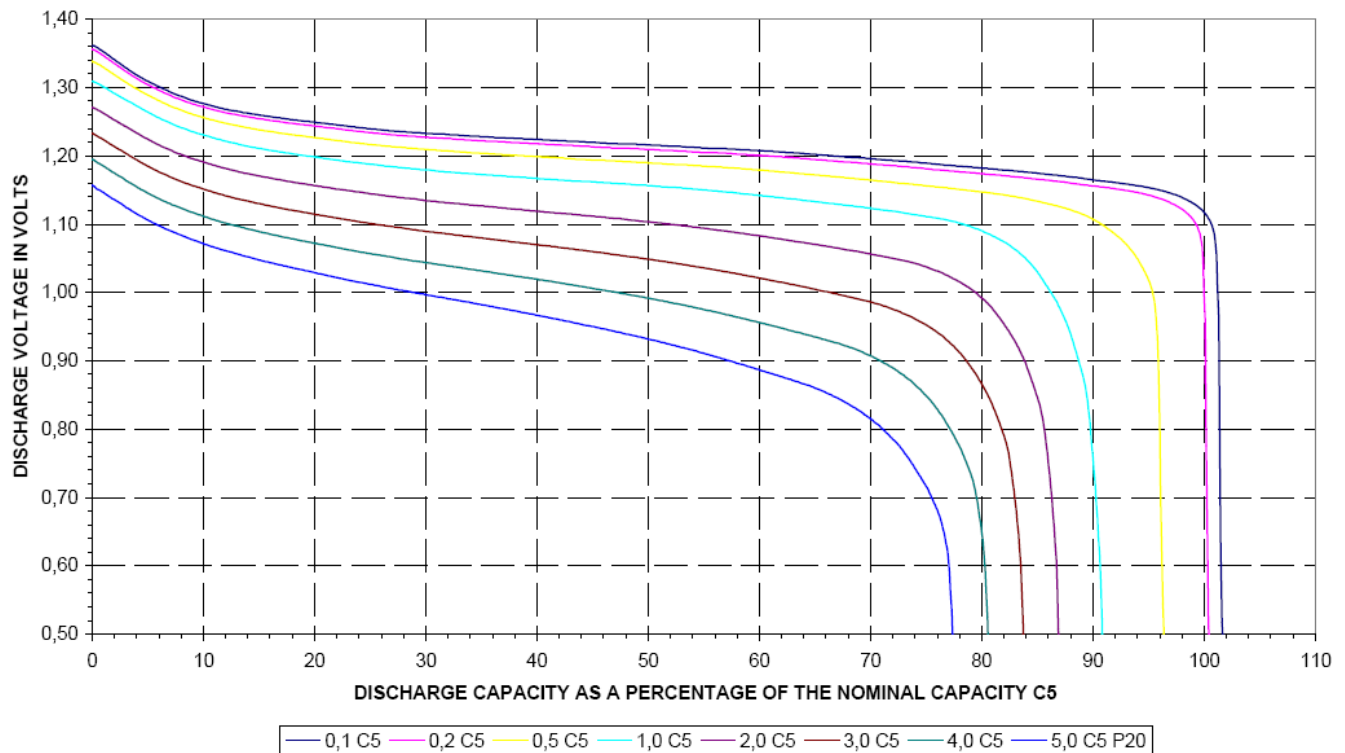
Geschäftsführer:
Dr. Marc Zoellner
Dr. Gunter SchädlichBankverbindung:
Landesbank Baden-Württemberg, Stuttgart
BLZ 600 501 01 · Konto-Nr. 13 837 95
BIC/SWIFT: SOLA DE ST
IBAN: DE52600501010001383795Commerzbank AG, Zwickau
BLZ 870 400 00 · Konto-Nr. 256 230 400
BIC/SWIFT: COBA DE FF XXX
IBAN: DE02870400000256230400

Courbe de décharges à différents courant de 0,1 à 5C5 donnés à +20°C :

Application Engineering



NI-CD CELL FNC H-TYPE
DISCHARGE WITH DIFFERENT LOADS AT +20°C

FNC-H P20.xls
Chart (Corrected)

12.05.05

Railway Department
NAT / Ba

HOPPECKE Batterie Systeme GmbH
Rechtsform:
Gesellschaft mit beschränkter Haftung
Sitz Brilon · Amtsgericht Arnsberg HRB 3602

DIN EN ISO 14001 · DIN EN ISO 9001 : 2000

UIDNR: DE124278855 · Gerichtsstand ist Brilon· Erfüllungsort für Lieferungen und Zahlungen ist Brilon

Geschäftsführer:
Dr. Marc Zoellner
Dr. Gunter Schädlich

Bankverbindung:
Landesbank Baden-Württemberg, Stuttgart
BLZ 600 501 01 · Konto-Nr. 13 837 95
BIC/SWIFT: SOLA DE ST
IBAN: DE52600501010001383795

Commerzbank AG, Zwickau
BLZ 870 400 00 · Konto-Nr. 256 230 400
BIC/SWIFT: COBA DE FF XXX
IBAN: DE02870400000256230400

C.2.2 Cellule Ni-Zn de SCPS

Les caractéristiques de la batterie NiZn fabriquée par SCPS sont données le tableau ci-dessus :

Tab. C.1: Caractéristiques du module NiZn de 30 Ah développé par SCPS

Caractéristiques	Valeurs
Capacité nominale	30 Ah
Tension nominale du module	36 V
Tension nominal d'un élément	1.65 V
Densité d'énergie massique	70 à 80 Wh/kg
Densité d'énergie volumique	140 Wh/dm ³
Densité de puissance	400 W/kg
Résistance interne	2.2 mΩ
Nombre de cycles à C/3 en charge et décharge (80% DoD)	1000
Nombre de cycles à C en charge et décharge (80% DoD)	800
Nombre de cycles à C en charge et 3C en décharge (80% DoD)	600
Plage de température en fonctionnement	-20 à 55°C
Poids	0.81 kg
Prix	210 à 230 €/kWh

C.3 Fiche technique du supercondensateur B49410B2506Q000 (5000 F/2.5 V)



Ultracapacitors

The following products presented in this data sheet are being withdrawn.

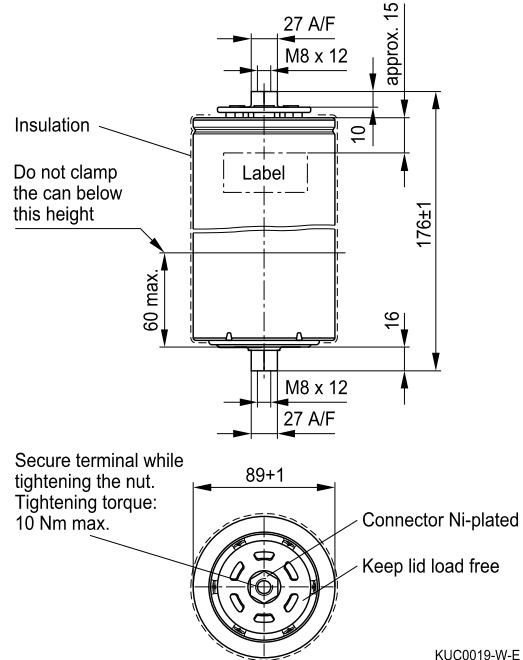
Ordering Code	Substitute Product	Date of Withdrawal	Deadline Last Orders	Last Shipments
B49410B2506Q000		2006-09-26	2006-12-31	2007-03-31

For further information please contact your nearest EPCOS sales office, which will also support you in selecting a suitable substitute. The addresses of our worldwide sales network are presented at www.epcos.com/sales.

Features

- Screw terminals M8 × 12
- Power type
- Insulated with polyurethane
- Short-circuit-proof

Dimensional drawing



Dimensions in mm

Electrical specifications

Rated capacitance	($T_A = 25\text{ °C}$; DCC) ¹⁾	C_R	5000	F
Tolerance of C_R			-10/+30	%
Rated voltage	($T_A = 25\text{ °C}$)	V_R	2.5	V
Capacity			3500	mAh
Specific power	($P_{\text{spez}} = 0.12 \cdot V_R^2 / \text{ESR}_{\text{DC}} / \text{m}$)		2.0	kW/kg
Specific power	($P_{\text{spez}} = 0.12 \cdot V_R^2 / \text{ESR}_{\text{DC}} / \text{v}$)		2.3	kW/l
Stored energy	($V = V_R$)	E	15625	J
Specific energy	($V = V_R$)		4.1	Wh/kg
Specific energy	($V = V_R$)		4.7	Wh/l
Surge voltage		V_{surge}	2.8	V
Maximum series resistance	($T_A = 25\text{ °C}$; 1 kHz)	ESR	180	$\mu\Omega$
Maximum series resistance	($T_A = 25\text{ °C}$; 50 mHz)	ESR_{DC}	350	$\mu\Omega$
Mass		m	1050	g
Volume	(without terminals)	v	0.93	l
Operating temperature range		T_{op}	-30/+70	°C
Storage temperature	($V = 0\text{ V}$)	T_{st}	-40/+70	°C
Lifetime (hours) ²⁾	($T_A = 25\text{ °C}$; $V = V_R$)		90000	h
Lifetime (cycles) ³⁾	($T_A = 25\text{ °C}$; $I = 100\text{ A}$)		500000	cycles

1) DCC: discharging with constant current.

2) Requirements: $|\Delta C/C_R| \leq 30\%$, $\text{ESR} \leq 2$ times of specified limit, $I_{\text{leak}} \leq 2$ times of initial value.

3) Requirements: $|\Delta C/C_R| \leq 30\%$, $\text{ESR} \leq 2$ times of specified limit, $I_{\text{leak}} \leq 2$ times of initial value (1 cycle: charging to V_R , 30 s rest, discharging to $V_R/2$, 30 s rest).

Cautions and warnings

Transportation of hazardous substances

Any shipment of UltraCaps from customers, whatever the means of transportation, must be provided with a declaration of hazardous substances and packed accordingly if the quantity of electrolyte per item packed exceeds 0.5 liters. We will be glad to assist you in clarifying details.

For transportation on streets in Europe detailed regulations are given in ADR/RID / UN 1648 Acetonitrile. Customers outside the European Union should refer to their local regulations. For transportation by sea freight please refer to IMDG regulations, for transportation by air freight please refer to IATA regulations.

Waste regulations

UltraCaps must be disposed of according to the European waste catalog, code number 160213 "Waste from electrical and electronic products ". In addition, we request customers to consult their refuse disposal facilities and local or national authorities.

Users outside of the European Union should refer to the waste disposal regulations of their own particular country.

Warning

- Do not put into fire!
- Do not open the capacitor!
- To avoid health and fire hazards, do not operate the capacitor beyond the voltage or temperature limits given in the data sheet. Any excess may also result in a reduction of lifetime.

Important Notes

The following applies to all products named in this publication:

1. Some parts of this publication contain **statements about the suitability of our products for certain areas of application**. These statements are based on our knowledge of typical requirements that are often placed on our products in the areas of application concerned. We nevertheless expressly point out **that such statements cannot be regarded as binding statements about the suitability of our products for a particular customer application**. As a rule, EPCOS is either unfamiliar with individual customer applications or less familiar with them than the customers themselves. For these reasons, it is always ultimately incumbent on the customer to check and decide whether an EPCOS product with the properties described in the product specification is suitable for use in a particular customer application.
2. We also point out that **in individual cases, a malfunction of passive electronic components or failure before the end of their usual service life cannot be completely ruled out in the current state of the art, even if they are operated as specified**. In customer applications requiring a very high level of operational safety and especially in customer applications in which the malfunction or failure of a passive electronic component could endanger human life or health (e.g. in accident prevention or life-saving systems), it must therefore be ensured by means of suitable design of the customer application or other action taken by the customer (e.g. installation of protective circuitry or redundancy) that no injury or damage is sustained by third parties in the event of malfunction or failure of a passive electronic component.
3. **The warnings, cautions and product-specific notes must be observed.**
4. In order to satisfy certain technical requirements, **some of the products described in this publication may contain substances subject to restrictions in certain jurisdictions (e.g. because they are classed as "hazardous")**. Useful information on this will be found in our Material Data Sheets on the Internet (www.epcos.com/material). Should you have any more detailed questions, please contact our sales offices.
5. We constantly strive to improve our products. Consequently, **the products described in this publication may change from time to time**. The same is true of the corresponding product specifications. Please check therefore to what extent product descriptions and specifications contained in this publication are still applicable before or when you place an order.
We also **reserve the right to discontinue production and delivery of products**. Consequently, we cannot guarantee that all products named in this publication will always be available.
6. Unless otherwise agreed in individual contracts, **all orders are subject to the current version of the "General Terms of Delivery for Products and Services in the Electrical Industry" published by the German Electrical and Electronics Industry Association (ZVEI)**.
7. The trade names EPCOS, CeraDiode, CSSP, PhaseCap, PhaseMod, SilverCap, SIFI, SIMID, SIKOREL, SIOV, SIP5D, SIP5K, TOPcap, UltraCap, WindCap are **trademarks registered or pending** in Europe and in other countries. Further information will be found on the Internet at www.epcos.com/trademarks.

C.4 Fiche technique du l'IGBT FF450R12ME3 de Infineon

EconoDUAL™ Modul mit Trench/Feldstop IGBT3 und High Efficiency Diode

EconoDUAL™ module with trench/fieldstop IGBT3 and EmCon High Efficiency diode

IGBT-Wechselrichter / IGBT-inverter**Vorläufige Daten / preliminary data****Höchstzulässige Werte / maximum rated values**

Kollektor-Emitter-Sperrspannung collector-emitter voltage	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$	V_{CES}	1200	V
Kollektor-Dauergleichstrom DC-collector current	$T_C = 80^{\circ}\text{C}, T_{vj} = 150^{\circ}\text{C}$ $T_C = 25^{\circ}\text{C}, T_{vj} = 150^{\circ}\text{C}$	$I_{C\text{ nom}}$ I_C	450 600	A A
Periodischer Kollektor Spitzenstrom repetitive peak collector current	$t_p = 1\text{ ms}$	I_{CRM}	900	A
Gesamt-Verlustleistung total power dissipation	$T_C = 25^{\circ}\text{C}, T_{vj} = 150^{\circ}\text{C}$	P_{tot}	2100	W
Gate-Emitter-Spitzenspannung gate-emitter peak voltage		V_{GES}	+/-20	V

Charakteristische Werte / characteristic values

			min.	typ.	max.	
Kollektor-Emitter Sättigungsspannung collector-emitter saturation voltage	$I_C = 450\text{ A}, V_{GE} = 15\text{ V}$ $I_C = 450\text{ A}, V_{GE} = 15\text{ V}$	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 125^{\circ}\text{C}$	$V_{CE\text{ sat}}$	1,70 2,00	2,15	V V
Gate-Schwellenspannung gate threshold voltage	$I_C = 18,0\text{ mA}, V_{CE} = V_{GE}, T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$		V_{GEth}	5,0	5,8	6,5 V
Gateladung gate charge	$V_{GE} = -15\text{ V} \dots +15\text{ V}$		Q_G	4,30		μC
Interner Gatewiderstand internal gate resistor	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$		R_{Gint}	1,7		Ω
Eingangskapazität input capacitance	$f = 1\text{ MHz}, T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}, V_{CE} = 25\text{ V}, V_{GE} = 0\text{ V}$		C_{ies}	32,0		nF
Rückwirkungskapazität reverse transfer capacitance	$f = 1\text{ MHz}, T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}, V_{CE} = 25\text{ V}, V_{GE} = 0\text{ V}$		C_{res}	1,50		nF
Kollektor-Emitter Reststrom collector-emitter cut-off current	$V_{CE} = 1200\text{ V}, V_{GE} = 0\text{ V}, T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$		I_{CES}		5,0	mA
Gate-Emitter Reststrom gate-emitter leakage current	$V_{CE} = 0\text{ V}, V_{GE} = 20\text{ V}, T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$		I_{GES}		400	nA
Einschaltverzögerungszeit (ind. Last) turn-on delay time (inductive load)	$I_C = 450\text{ A}, V_{CE} = 600\text{ V}$ $V_{GE} = \pm 15\text{ V}$ $R_{Gon} = 1,6\ \Omega$	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 125^{\circ}\text{C}$	$t_{d\text{ on}}$	0,25 0,30		μs μs
Anstiegszeit (induktive Last) rise time (inductive load)	$I_C = 450\text{ A}, V_{CE} = 600\text{ V}$ $V_{GE} = \pm 15\text{ V}$ $R_{Gon} = 1,6\ \Omega$	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 125^{\circ}\text{C}$	t_r	0,09 0,10		μs μs
Abschaltverzögerungszeit (ind. Last) turn-off delay time (inductive load)	$I_C = 450\text{ A}, V_{CE} = 600\text{ V}$ $V_{GE} = \pm 15\text{ V}$ $R_{Goff} = 1,6\ \Omega$	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 125^{\circ}\text{C}$	$t_{d\text{ off}}$	0,55 0,65		μs μs
Fallzeit (induktive Last) fall time (inductive load)	$I_C = 450\text{ A}, V_{CE} = 600\text{ V}$ $V_{GE} = \pm 15\text{ V}$ $R_{Goff} = 1,6\ \Omega$	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 125^{\circ}\text{C}$	t_f	0,13 0,16		μs μs
Einschaltverlustenergie pro Puls turn-on energy loss per pulse	$I_C = 450\text{ A}, V_{CE} = 600\text{ V}, L_S = 80\text{ nH}$ $V_{GE} = \pm 15\text{ V}, di/dt = 7800\text{ A}/\mu\text{s} (T_{vj}=125^{\circ}\text{C})$ $R_{Gon} = 1,6\ \Omega$	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 125^{\circ}\text{C}$	E_{on}	22,0 33,0		mJ mJ
Abschaltverlustenergie pro Puls turn-off energy loss per pulse	$I_C = 450\text{ A}, V_{CE} = 600\text{ V}, L_S = 80\text{ nH}$ $V_{GE} = \pm 15\text{ V}, du/dt = 3600\text{ V}/\mu\text{s} (T_{vj}=125^{\circ}\text{C})$ $R_{Goff} = 1,6\ \Omega$	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 125^{\circ}\text{C}$	E_{off}	43,0 65,0		mJ mJ
Kurzschlussverhalten SC data	$V_{GE} \leq 15\text{ V}, V_{CC} = 900\text{ V}$ $V_{CEmax} = V_{CES} - L_{sCE} \cdot di/dt$ $t_p \leq 10\ \mu\text{s}, T_{vj} = 125^{\circ}\text{C}$		I_{SC}	1800		A
Innerer Wärmewiderstand thermal resistance, junction to case	pro IGBT per IGBT		R_{thJC}		0,06	K/W
Übergangs-Wärmewiderstand thermal resistance, case to heatsink	pro IGBT / per IGBT $\lambda_{Paste} = 1\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ / $\lambda_{grease} = 1\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$		R_{thCH}	0,03		K/W

prepared by: Martin Knecht

date of publication: 2007-06-04

approved by: Wilhelm Rusche

revision: 2.1

Vorläufige Daten
preliminary data

Diode-Wechselrichter / diode-inverter

Höchstzulässige Werte / maximum rated values

Periodische Spitzensperrspannung repetitive peak reverse voltage	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$	V_{RRM}	1200	V
Dauergleichstrom DC forward current		I_F	450	A
Periodischer Spitzenstrom repetitive peak forward current	$t_p = 1 \text{ ms}$	I_{FRM}	900	A
Grenzlastintegral I^2t - value	$V_R = 0 \text{ V}$, $t_p = 10 \text{ ms}$, $T_{vj} = 125^{\circ}\text{C}$	I^2t	35000	A^2s

Charakteristische Werte / characteristic values

				min.	typ.	max.	
Durchlassspannung forward voltage	$I_F = 450 \text{ A}$, $V_{GE} = 0 \text{ V}$ $I_F = 450 \text{ A}$, $V_{GE} = 0 \text{ V}$	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 125^{\circ}\text{C}$	V_F		1,65 1,65	2,15	V V
Rückstromspitze peak reverse recovery current	$I_F = 450 \text{ A}$, $-di_F/dt = 7800 \text{ A}/\mu\text{s}$ ($T_{vj}=125^{\circ}\text{C}$) $V_R = 600 \text{ V}$ $V_{GE} = -15 \text{ V}$	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 125^{\circ}\text{C}$	I_{RM}		315 405		A A
Sperrverzögerungsladung recovered charge	$I_F = 450 \text{ A}$, $-di_F/dt = 7800 \text{ A}/\mu\text{s}$ ($T_{vj}=125^{\circ}\text{C}$) $V_R = 600 \text{ V}$ $V_{GE} = -15 \text{ V}$	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 125^{\circ}\text{C}$	Q_r		45,0 85,0		μC μC
Abschaltenergie pro Puls reverse recovery energy	$I_F = 450 \text{ A}$, $-di_F/dt = 7800 \text{ A}/\mu\text{s}$ ($T_{vj}=125^{\circ}\text{C}$) $V_R = 600 \text{ V}$ $V_{GE} = -15 \text{ V}$	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 125^{\circ}\text{C}$	E_{rec}		21,0 39,0		mJ mJ
Innerer Wärmewiderstand thermal resistance, junction to case	pro Diode per diode		R_{thJC}			0,10	K/W
Übergangs-Wärmewiderstand thermal resistance, case to heatsink	pro Diode / per diode $\lambda_{\text{Paste}} = 1 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ / $\lambda_{\text{grease}} = 1 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$		R_{thCH}		0,05		K/W

NTC-Widerstand / NTC-thermistor

Charakteristische Werte / characteristic values

				min.	typ.	max.	
Nennwiderstand rated resistance	$T_C = 25^{\circ}\text{C}$	R_{25}			5,00		k Ω
Abweichung von R_{100} deviation of R_{100}	$T_C = 100^{\circ}\text{C}$, $R_{100} = 493 \Omega$	$\Delta R/R$	-5			5	%
Verlustleistung power dissipation	$T_C = 25^{\circ}\text{C}$	P_{25}				20,0	mW
B-Wert B-value	$R_2 = R_{25} \exp [B_{25/50}(1/T_2 - 1/(298,15 \text{ K}))]$	$B_{25/50}$			3375		K

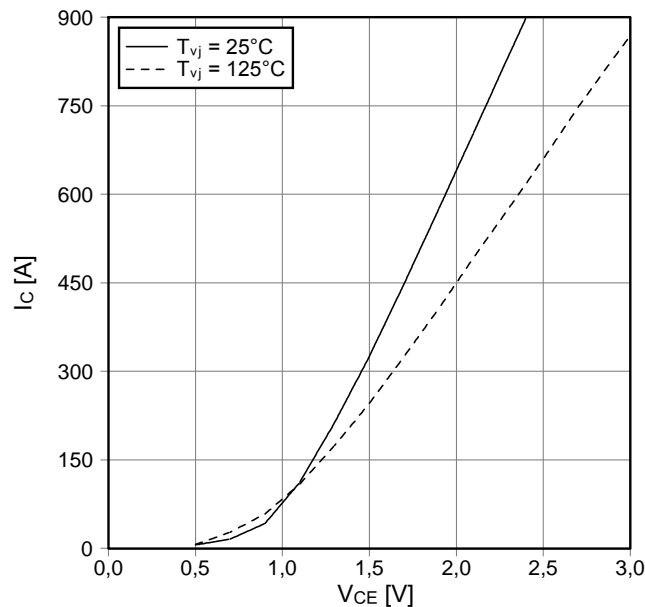
Vorläufige Daten
preliminary data

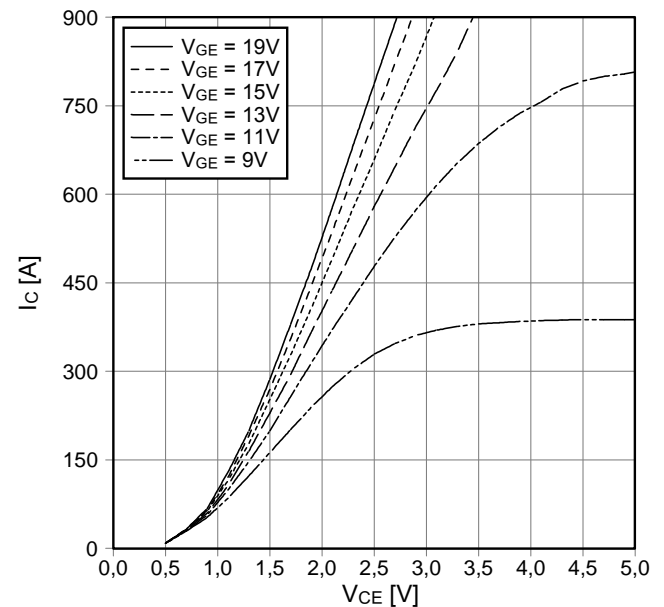
Modul / module

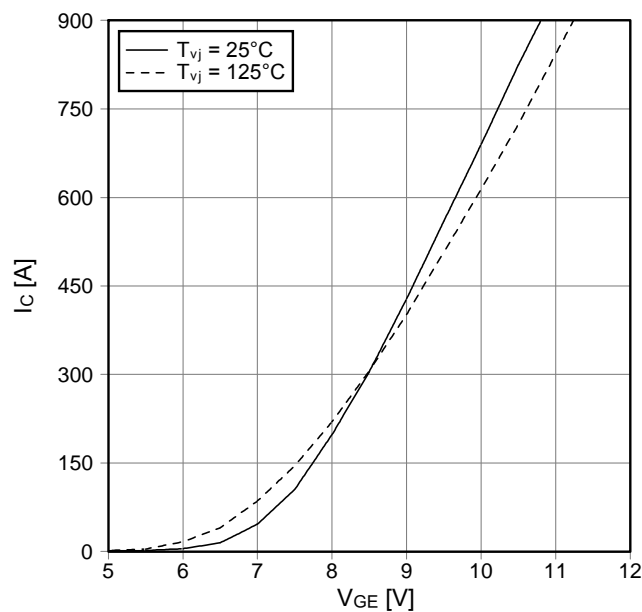
Isolations-Prüfspannung insulation test voltage	RMS, f = 50 Hz, t = 1 min.	V _{ISO}	2,5	kV
Material Modulgrundplatte material of module baseplate			Cu	
Material für innere Isolation material for internal insulation			Al ₂ O ₃	
Kriechstrecke creepage distance	Kontakt - Kühlkörper / terminal to heatsink Kontakt - Kontakt / terminal to terminal		14,5 13,0	mm
Luftstrecke clearance distance	Kontakt - Kühlkörper / terminal to heatsink Kontakt - Kontakt / terminal to terminal		12,5 10,0	mm
Vergleichszahl der Kriechwegbildung comparative tracking index		CTI	> 225	
Übergangs-Wärmewiderstand thermal resistance, case to heatsink	pro Modul / per module $\lambda_{\text{Paste}} = 1 \text{ W/(m}\cdot\text{K)} / \lambda_{\text{grease}} = 1 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$	R _{thCH}	min. 0,009	typ. max. K/W
Modulinduktivität stray inductance module		L _{sCE}	20	nH
Modulleitungswiderstand, Anschlüsse - Chip module lead resistance, terminals - chip	T _C = 25°C, pro Schalter / per switch	R _{CC'+EE'}	1,10	mΩ
Höchstzulässige Sperrschichttemperatur maximum junction temperature	Wechselrichter, Brems-Chopper / Inverter, Brake-Chopper	T _{vj max}		150 °C
Temperatur im Schaltbetrieb temperature under switching conditions	Wechselrichter, Brems-Chopper / Inverter, Brake-Chopper	T _{vj op}	-40	125 °C
Lagertemperatur storage temperature		T _{stg}	-40	125 °C
Anzugsdrehmoment f. mech. Befestigung mounting torque	Schraube M5 - Montage gem. gültiger Applikation Note screw M5 - mounting according to valid application note	M	3,00	- 6,00 Nm
Anzugsdrehmoment f. elektr. Anschlüsse terminal connection torque	Schraube M6 - Montage gem. gültiger Applikation Note screw M6 - mounting according to valid application note	M	3,0	- 6,0 Nm
Gewicht weight		G	345	g

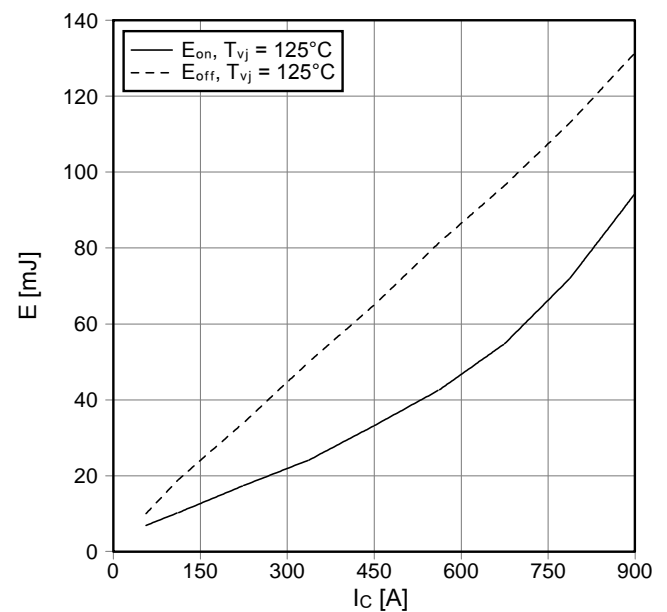
Vorläufige Daten
preliminary data

Ausgangskennlinie IGBT-Wechselr. (typisch)
output characteristic IGBT-inverter (typical)

 $I_C = f(V_{CE})$
 $V_{GE} = 15\text{ V}$

Ausgangskennlinienfeld IGBT-Wechselr. (typisch)
output characteristic IGBT-inverter (typical)

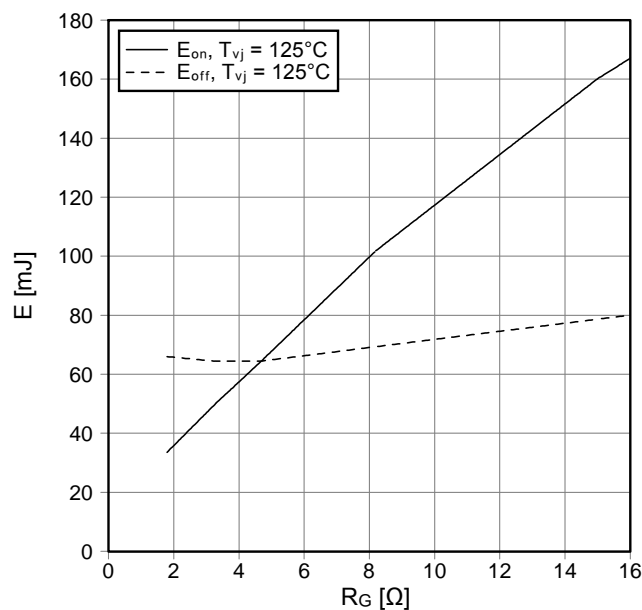
 $I_C = f(V_{CE})$
 $T_{vj} = 125^\circ\text{C}$

Übertragungscharakteristik IGBT-Wechselr. (typisch)
transfer characteristic IGBT-inverter (typical)

 $I_C = f(V_{GE})$
 $V_{CE} = 20\text{ V}$

Schaltverluste IGBT-Wechselr. (typisch)
switching losses IGBT-inverter (typical)

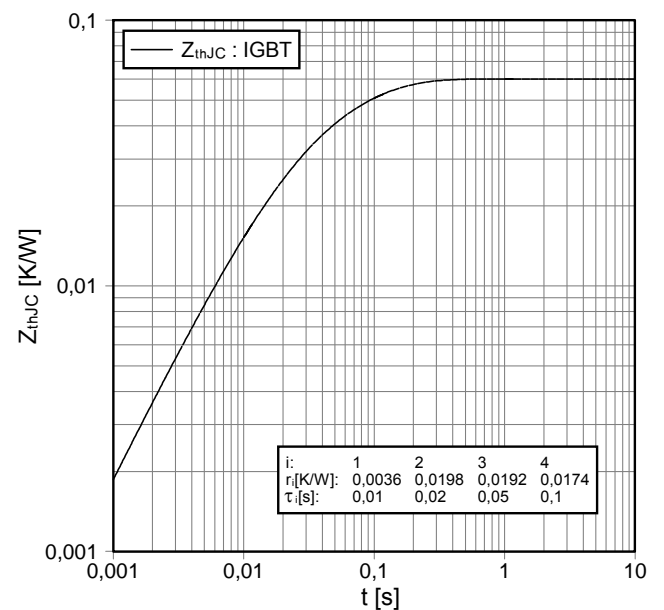
 $E_{on} = f(I_C)$, $E_{off} = f(I_C)$
 $V_{GE} = \pm 15\text{ V}$, $R_{Gon} = 1.6\ \Omega$, $R_{Goff} = 1.6\ \Omega$, $V_{CE} = 600\text{ V}$


Vorläufige Daten
preliminary data

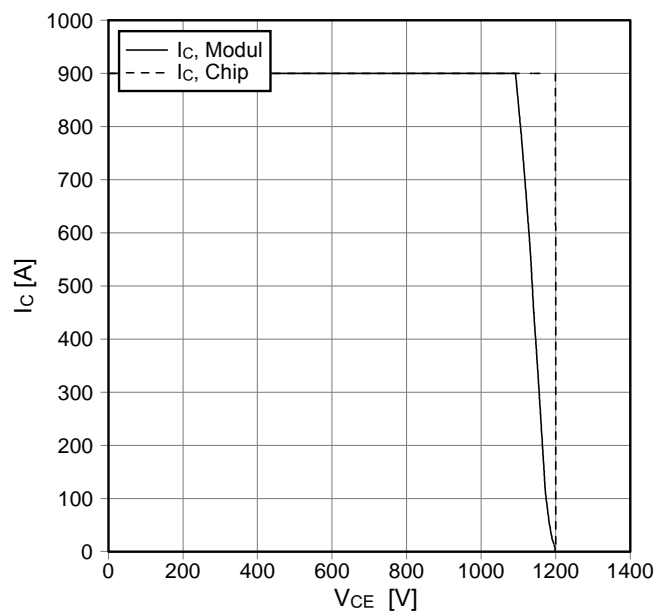
Schaltverluste IGBT-Wechselr. (typisch)
switching losses IGBT-Inverter (typical)
 $E_{on} = f(R_G)$, $E_{off} = f(R_G)$
 $V_{GE} = \pm 15 \text{ V}$, $I_C = 450 \text{ A}$, $V_{CE} = 600 \text{ V}$



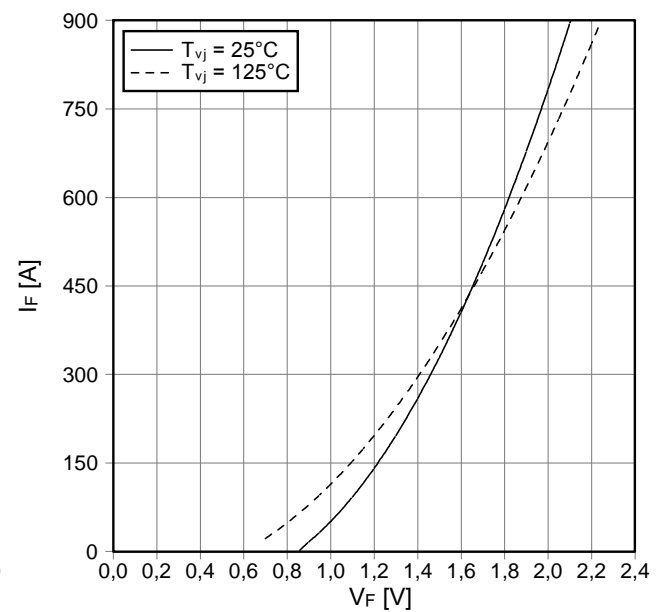
Transienter Wärmewiderstand IGBT-Wechselr.
transient thermal impedance IGBT-inverter
 $Z_{thJC} = f(t)$



Sicherer Rückwärts-Arbeitsbereich IGBT-Wr. (RBSOA)
reverse bias safe operating area IGBT-inv. (RBSOA)
 $I_C = f(V_{CE})$
 $V_{GE} = \pm 15 \text{ V}$, $R_{Goff} = 1.6 \Omega$, $T_{vj} = 125^\circ\text{C}$

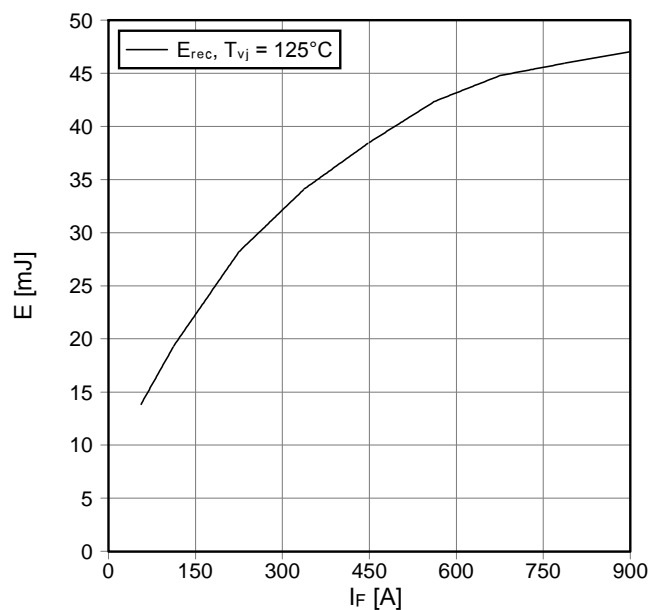


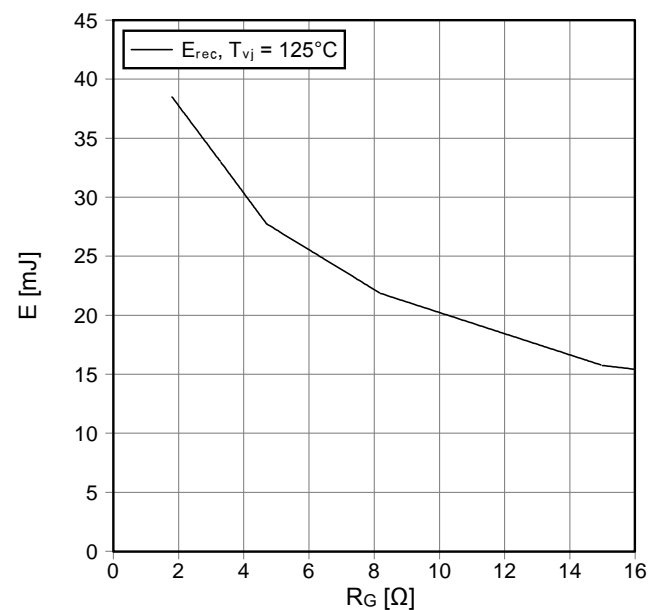
Durchlasskennlinie der Diode-Wechselr. (typisch)
forward characteristic of diode-inverter (typical)
 $I_F = f(V_F)$

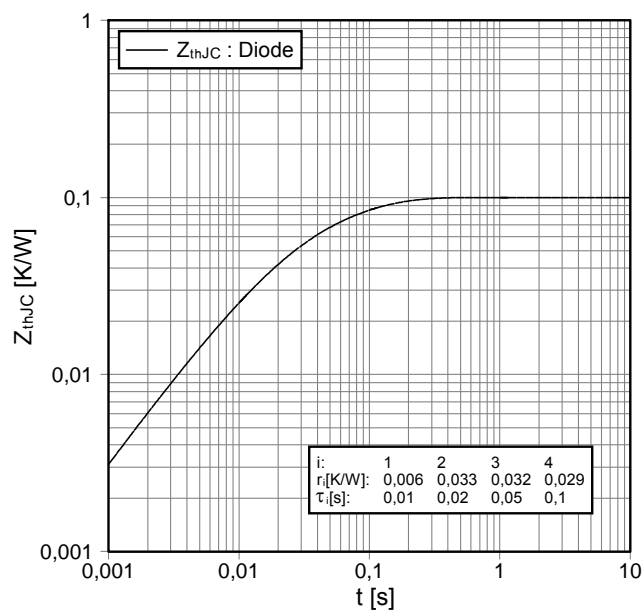


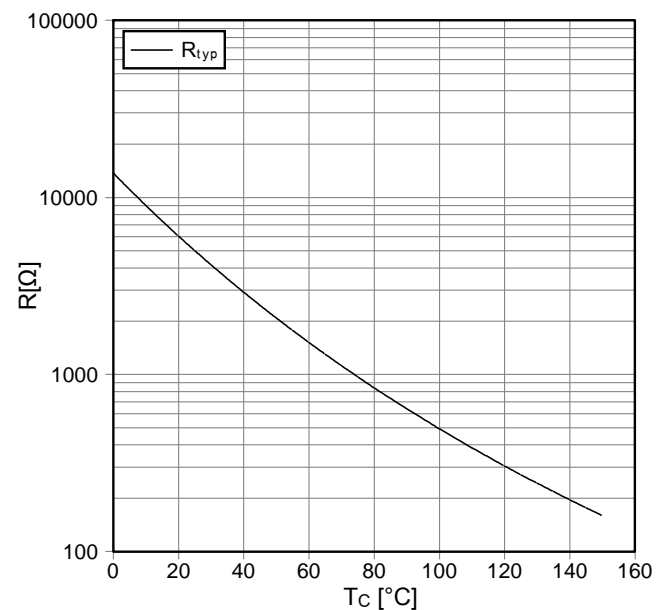
Vorläufige Daten
preliminary data

Schaltverluste Diode-Wechselr. (typisch)
switching losses diode-inverter (typical)

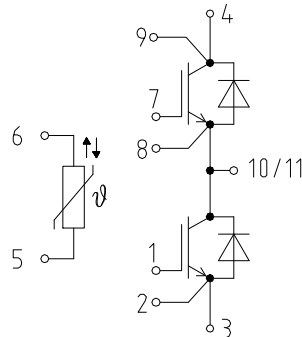
 $E_{rec} = f(I_F)$
 $R_{Gon} = 1.6 \Omega$, $V_{CE} = 600 V$

Schaltverluste Diode-Wechselr. (typisch)
switching losses diode-inverter (typical)

 $E_{rec} = f(R_G)$
 $I_F = 450 A$, $V_{CE} = 600 V$

Transienter Wärmewiderstand Diode-Wechselr.
transient thermal impedance diode-inverter

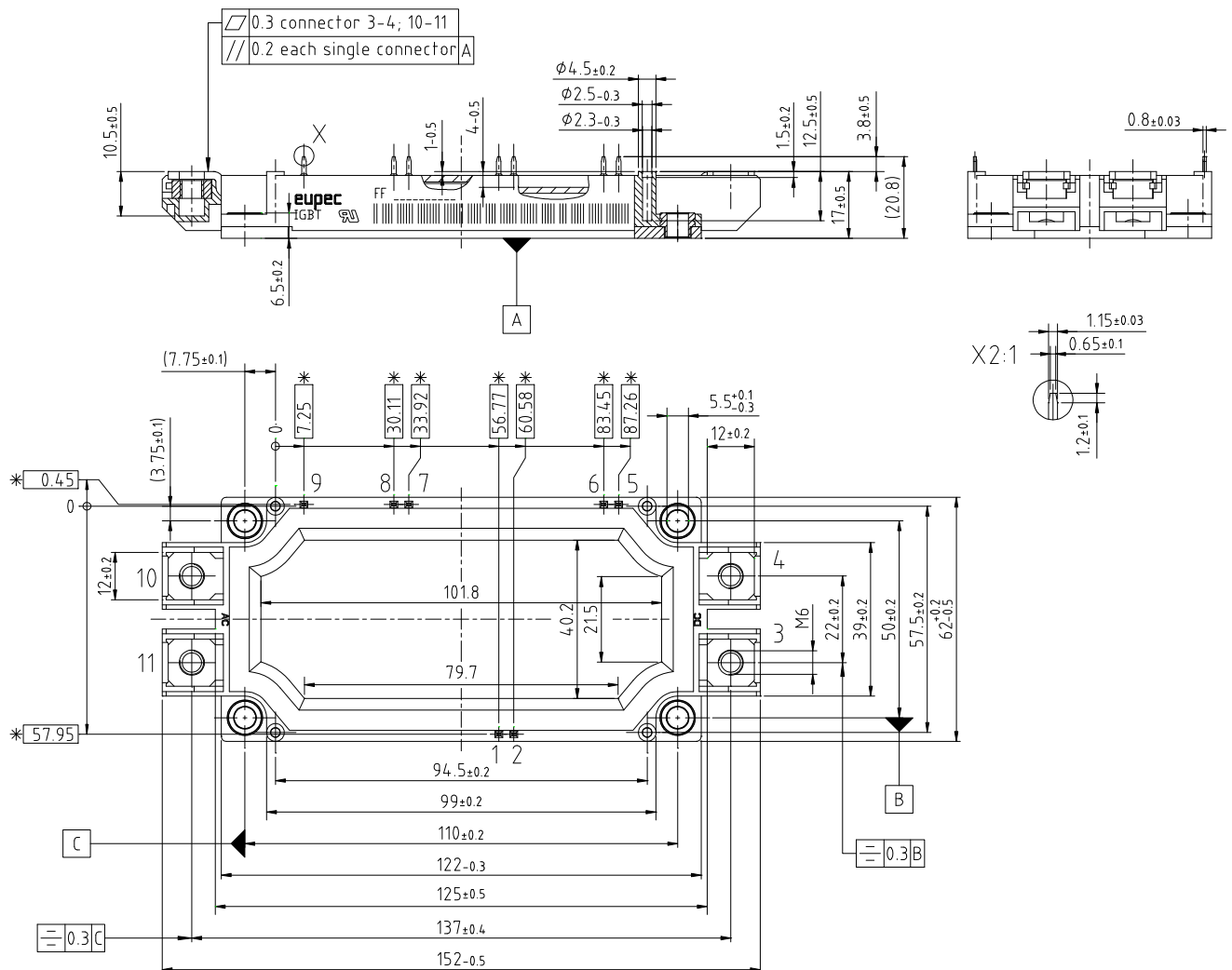
 $Z_{thJC} = f(t)$

NTC-Temperaturkennlinie (typisch)
NTC-temperature characteristic (typical)

 $R = f(T)$


Schaltplan / circuit diagram



Gehäuseabmessungen / package outlines



* = all dimensions with a tolerance of ± 0.5

dimensions valid in mounted condition

prepared by: Martin Knecht	date of publication: 2007-06-04
approved by: Wilhelm Rusche	revision: 2.1

Vorläufige Daten
preliminary data**Nutzungsbedingungen**

Die in diesem Produktdatenblatt enthaltenen Daten sind ausschließlich für technisch geschultes Fachpersonal bestimmt. Die Beurteilung der Eignung dieses Produktes für Ihre Anwendung sowie die Beurteilung der Vollständigkeit der bereitgestellten Produktdaten für diese Anwendung obliegt Ihnen bzw. Ihren technischen Abteilungen.

In diesem Produktdatenblatt werden diejenigen Merkmale beschrieben, für die wir eine liefervertragliche Gewährleistung übernehmen. Eine solche Gewährleistung richtet sich ausschließlich nach Maßgabe der im jeweiligen Liefervertrag enthaltenen Bestimmungen. Garantien jeglicher Art werden für das Produkt und dessen Eigenschaften keinesfalls übernommen.

Sollten Sie von uns Produktinformationen benötigen, die über den Inhalt dieses Produktdatenblatts hinausgehen und insbesondere eine spezifische Verwendung und den Einsatz dieses Produktes betreffen, setzen Sie sich bitte mit dem für Sie zuständigen Vertriebsbüro in Verbindung (siehe www.eupec.com, Vertrieb&Kontakt). Für Interessenten halten wir Application Notes bereit.

Aufgrund der technischen Anforderungen könnte unser Produkt gesundheitsgefährdende Substanzen enthalten. Bei Rückfragen zu den in diesem Produkt jeweils enthaltenen Substanzen setzen Sie sich bitte ebenfalls mit dem für Sie zuständigen Vertriebsbüro in Verbindung.

Sollten Sie beabsichtigen, das Produkt in Anwendungen der Luftfahrt, in gesundheits- oder lebensgefährdenden oder lebenserhaltenden Anwendungsbereichen einzusetzen, bitten wir um Mitteilung. Wir weisen darauf hin, dass wir für diese Fälle

- die gemeinsame Durchführung eines Risiko- und Qualitätsassessments;
- den Abschluss von speziellen Qualitätssicherungsvereinbarungen;
- die gemeinsame Einführung von Maßnahmen zu einer laufenden Produktbeobachtung dringend empfehlen und gegebenenfalls die Belieferung von der Umsetzung solcher Maßnahmen abhängig machen.

Soweit erforderlich, bitten wir Sie, entsprechende Hinweise an Ihre Kunden zu geben.

Inhaltliche Änderungen dieses Produktdatenblatts bleiben vorbehalten.

Terms & Conditions of usage

The data contained in this product data sheet is exclusively intended for technically trained staff. You and your technical departments will have to evaluate the suitability of the product for the intended application and the completeness of the product data with respect to such application.

This product data sheet is describing the characteristics of this product for which a warranty is granted. Any such warranty is granted exclusively pursuant the terms and conditions of the supply agreement. There will be no guarantee of any kind for the product and its characteristics.

Should you require product information in excess of the data given in this product data sheet or which concerns the specific application of our product, please contact the sales office, which is responsible for you (see www.eupec.com, sales&contact). For those that are specifically interested we may provide application notes.

Due to technical requirements our product may contain dangerous substances. For information on the types in question please contact the sales office, which is responsible for you.

Should you intend to use the Product in aviation applications, in health or life endangering or life support applications, please notify. Please note, that for any such applications we urgently recommend

- to perform joint Risk and Quality Assessments;
- the conclusion of Quality Agreements;
- to establish joint measures of an ongoing product survey, and that we may make delivery depended on the realization of any such measures.

If and to the extent necessary, please forward equivalent notices to your customers.

Changes of this product data sheet are reserved.

prepared by: Martin Knecht	date of publication: 2007-06-04
approved by: Wilhelm Rusche	revision: 2.1

Annexe D

Comptage des cycles d'un profil d'état de charge d'un dispositif de stockage

Nous présentons dans cet annexe l'algorithme du processus de comptage des cycles du profil d'état de charge d'un dispositif de stockage. Nous montrons à travers les sections de cet annexe les grandes étapes de cet algorithme.

D.1 Exemple de profil d'état de charge

Afin faciliter la compréhension de cet algorithme, nous raisonnerons sur une exemple théorique. La figure D.1 montre le profil d'état de charge qui servira d'exemple tout le long de cet annexe.

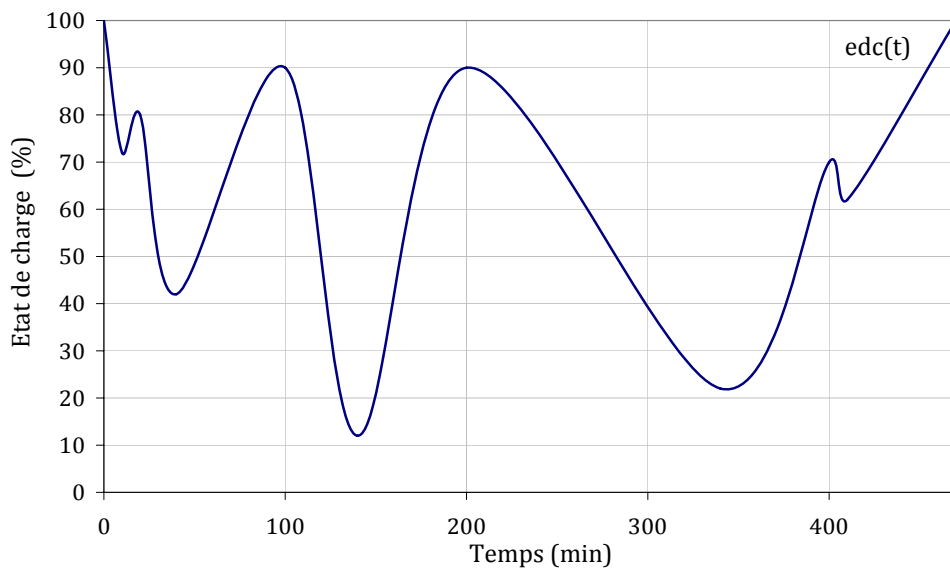


Fig. D.1: Exemple de profil d'état de charge

Comme le montre la figure la figure D.1, nous ne considérons que les profils fermés, c'est-à-dire que le dispositif de stockage doit être à 100% d'état de charge en début de mission et doit y revenir en fin de mission. Si cette condition n'est pas vérifiée, l'algorithme de comptage complète la mission sur ses bords. Généralement cette condition est vérifiée car la mission commence batteries pleines et se termine par une phase de recharge.

D.2 Balisage du profil d'état de charge

La première étape de comptage des cycles consiste au repérage et à l'enregistrement de l'ensemble des extremums du profil d'état de charge, comme le montre la figure D.2. Ce repérage permet d'obtenir une série de cycles initiaux C_i . Nous désignons par G_i les sommets gauches, D_i les sommets droits et M_i le centre des cycles numérotés de la gauche vers la droite, comme le montre la figure . Chaque cycles C_i est caractérisé par le triplet (G_i, M_i, D_i) . Deux cycles voisins C_i et C_{i+1} ont un sommet commun. Ce sommet est nommé à la fois par D_i et G_{i+1} . La profondeur d'un cycle C_i vaut :

$$DoD_i = \min(G_i - M_i, D_i - M_i) \quad (D.1)$$

Ainsi, nous pouvons dresser le tableau récapitulatif des cycles initiaux (nous parlons aussi de cycles bruts) :

Tab. D.1: Tableau des cycles bruts

C_i	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
DoD_i	8%	38%	78%	28%	8%

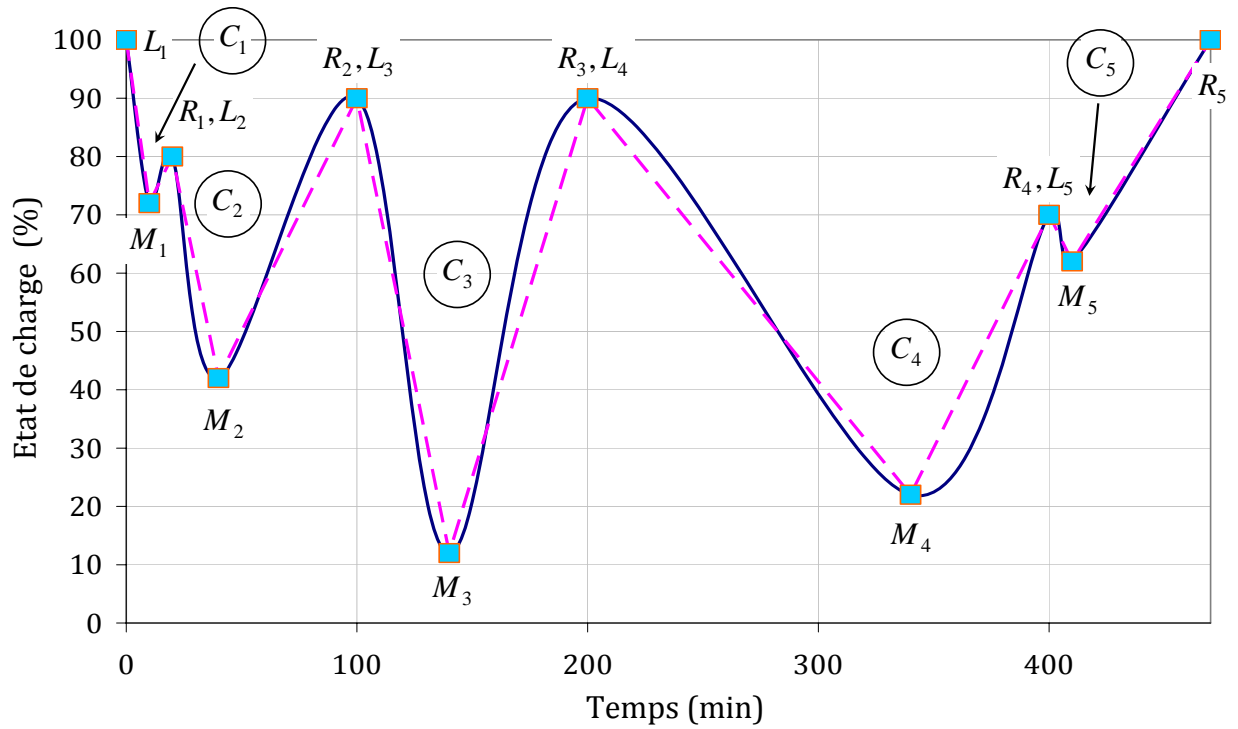


Fig. D.2: Balisage du profil d'état de charge

D.3 Comptage des cycles

Pour compter le nombre de cycles ayant entre 20% et 50% de profondeur de décharge, nous commençons par filtrer tous les cycles ayant moins de 20% de profondeur. Comme le montre la figure D.3, le cycle C_1 de profondeur 8% disparaît en faveur du cycles C_2 dont la profondeur passe de 38 à 48%. De même le cycle C_5 disparaît en faveur du cycle C_4 . Le nombre de cycles restants est : $n_{20} = 3$.

Ensuite, nous filtrons les cycles de moins de 50%. Comme le montre la figure D.4, le cycle C_2 disparaît à son tour en faveur du cycle C_3 . Le nombre de cycles restants vaut alors $n_{50} = 2$. La différence $n_{20} - n_{50} = 1$ est le nombre recherché. Il n'y a dans ce profil qu'un cycle entre 20 et 50% de profondeur de décharge : Ce résultat ne transparaît pas du tout dans le tableau des cycles initiaux : d'où la complexité du problème de comptage de cycles.

En réitérant le processus de filtrage pour des intervalles d'état de charge successifs, nous aboutissons à l'histogramme des cycles présenté au chapitre 4.

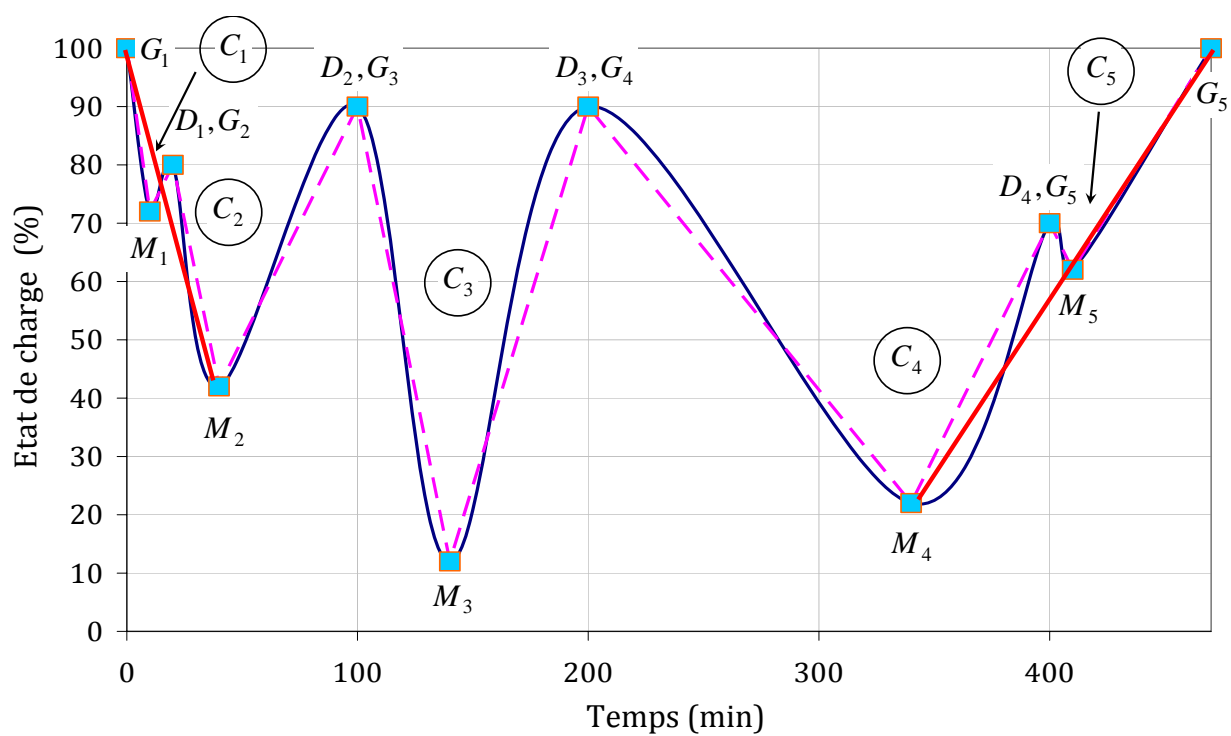


Fig. D.3: Filtrage des cycles de moins de 20% de profondeur

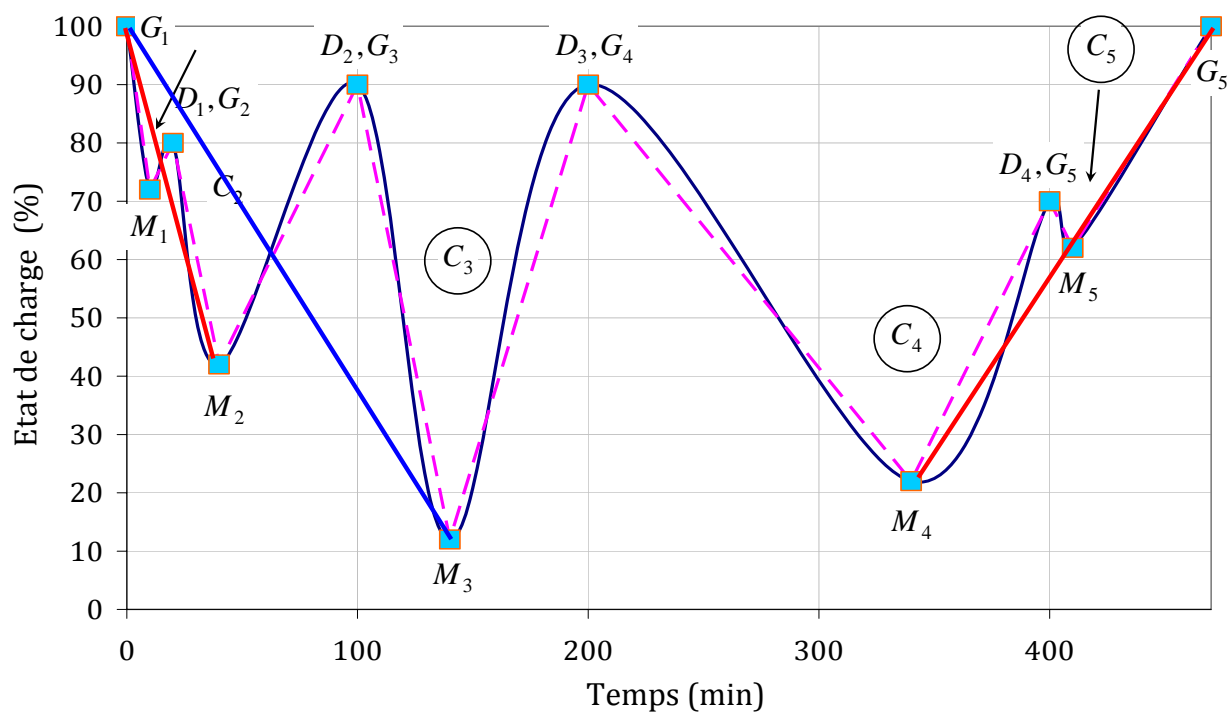


Fig. D.4: Filtrage des cycles de moins de 50% de profondeur

Annexe E

Calcul des régulateurs de courant et de tension

E.1 Régulation de courant

La figure E.1 montre le modèle du hacheur associé aux modules de batteries piloté par un régulateur de courant. Le régulateur de courant calcule la tension V_L aux bornes de la résistance $r_{cvs,bt}$ et l'inductance (L, r_L). Un système de compensation permet de compléter la tension V_L par la mesure de la tension V_{BT} . La somme V_H obtenue est divisée par la tension du bus pour déduire le rapport cyclique α_{bt} . La variable α_{bt} est écrêtée entre les limites 0.07 et 0.93 pour garder la contrôlabilité du système et respecter les temps morts entre commutations d'IGBTs. Ensuite, vient le modèle du hacheur que nous avons présenté à la section 5.2.1 (page 165).

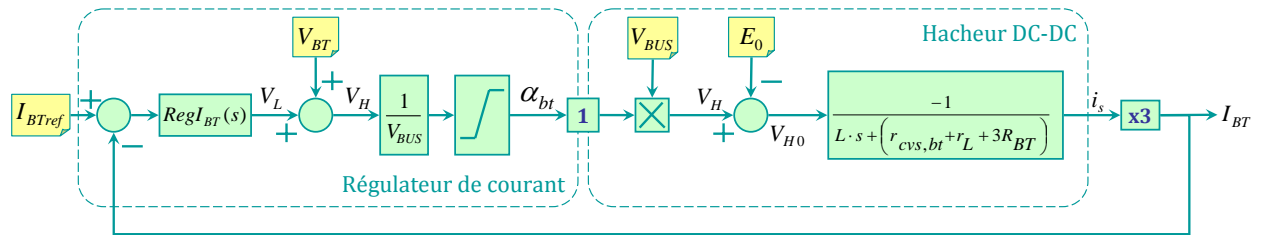


Fig. E.1: Modèle du hacheur et le régulateur de courant associé (1)

Dans le modèle de la figure E.1, nous pouvons supprimer la présence de la tension V_{BUS} en combinant la division et le produit par V_{BUS} , ce qui donne le modèle de la figure E.2a. Ensuite, sachant que :

$$V_{BT} = E_0 - R_{BT} \cdot I_{BT} = E_0 - 3 \times R_{BT} \cdot i_s \quad (E.1)$$

nous fusionnons la compensation V_{BT} et la rétroaction E_0 . Il en résulte, la compensation $-3 \times R_{BT} \cdot i_s$ comme le montre la figure E.2b. Cette compensation peut se traduire en

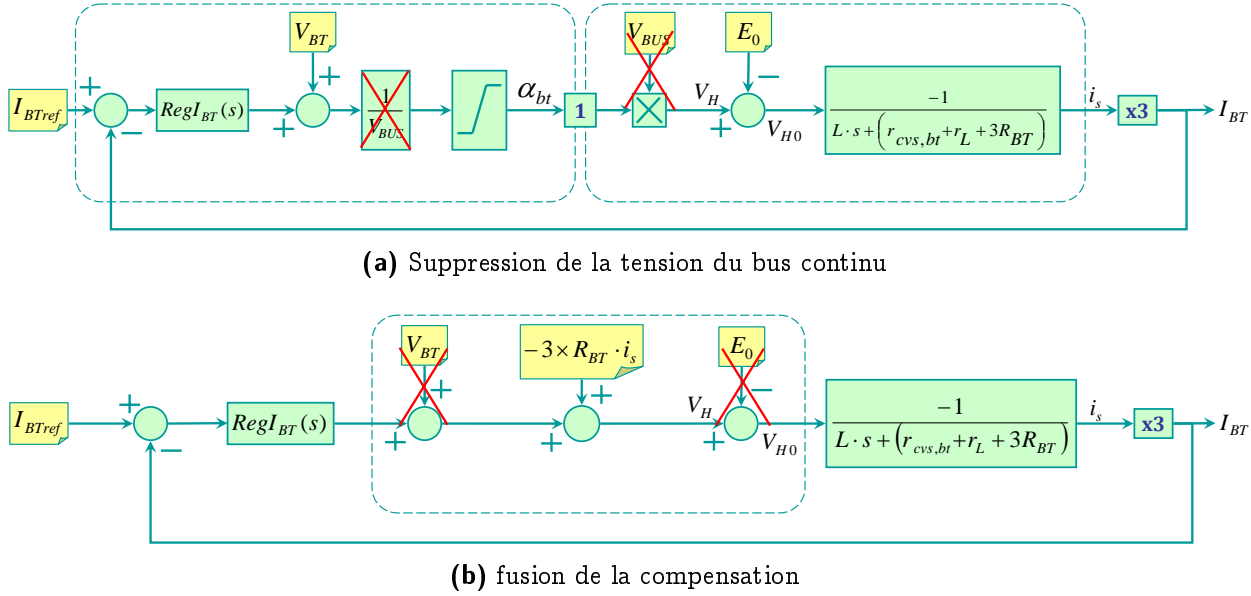


Fig. E.2: Modèle du hacheur et le régulateur de courant associé (2)

une rétroaction comme le montre la figure E.3a. La fonction de transfert correspondant au système contrôlé s'écrit :

$$\frac{I_{BT}(s)}{V_L(s)} = \frac{-1}{L \cdot s + r_{cvs,bt} + r_L + 3 \times R_{BT}} \cdot \frac{-1}{1 + 3 \times R_{BT} \cdot \frac{-1}{L \cdot s + r_{cvs,bt} + r_L + 3 \times R_{BT}}} \quad (E.2)$$

Soit :

$$\frac{I_{BT}(s)}{V_L(s)} = \frac{-1}{L \cdot s + r_{cvs,bt} + r_L + 3 \times R_{BT} - 3 \times R_{BT}} \quad (E.3)$$

Soit encore :

$$\frac{I_{BT}(s)}{V_L(s)} = \frac{-1}{L \cdot s + r_{cvs,bt} + r_L} \quad (E.4)$$

Le schéma global simplifié est donné à la figure E.3b. Au final, nous obtenons un système de premier ordre donc les paramètres ne dépendent que des paramètres du hacheur⁽¹⁾, ce qui implique que la régulation de courant dans les modules de stockage ne dépend pas des paramètres des modules de stockage, du moins pas directement⁽²⁾.

Le régulateur de courant est de type PI de la forme [41] :

⁽¹⁾Nous avons déjà signalé que la représentation des pertes par $r_{cvs,bt}$ est une approximation. Nous constatons ici que cette résistance agit de façon prépondérante sur la fonction de transfert courant-tension. En pratique, les régulateurs de courant sont suffisamment robustes pour compenser les écarts de modélisation.

⁽²⁾La résistance r_{cvs} matérialisant les pertes dans le hacheur est en effet fonction du module concerné : $r_{cvs,bt}$ vaut 206 mΩ alors que $r_{cvs,sc}$ vaut 522 mΩ.

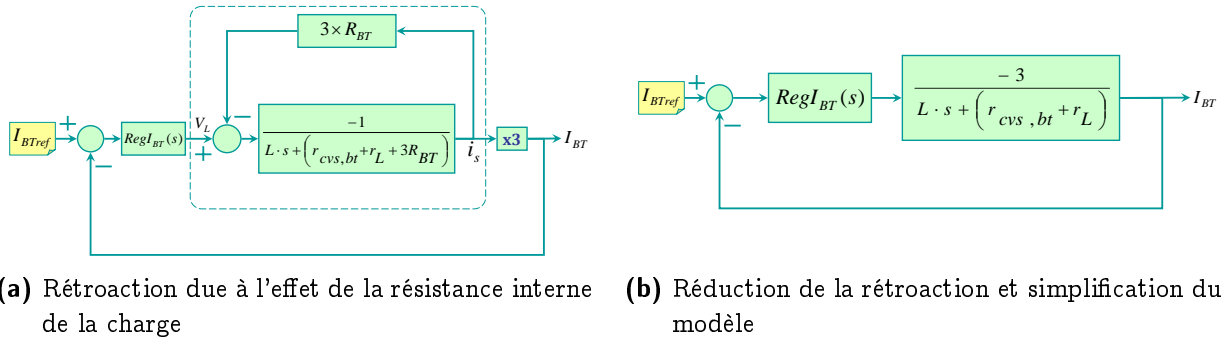


Fig. E.3: Modèle simplifié du hacheur et le régulateur de courant associé (3)

$$Reg I_{BT}(s) = k_{pbt} + \frac{k_{ibt}}{s} \quad (E.5)$$

Il vient la fonction transfert système régulé en boucle fermée :

$$\frac{I_{BT}(s)}{I_{BTref}(s)} = \frac{\left(k_{pbt} + \frac{k_{ibt}}{s}\right) \cdot \left(\frac{-3}{L \cdot s + r_{cvs, bt} + r_L}\right)}{1 + \left(k_{pbt} + \frac{k_{ibt}}{s}\right) \cdot \left(\frac{-3}{L \cdot s + r_{cvs, bt} + r_L}\right)} \quad (E.6)$$

Soit :

$$\frac{I_{BT}(s)}{I_{BTref}(s)} = \frac{1 + \frac{k_{pbt}}{k_{ibt}} \cdot s}{1 + \frac{3 \times k_{pbt} - r_{cvs, bt} - r_L}{3 \times k_{ibt}} \cdot s - \frac{L}{3 \times k_{ibt}} \cdot s^2} \quad (E.7)$$

Par identification du dénominateur avec la fonction type du second ordre, on obtient :

$$\begin{cases} \frac{1}{\omega_n^2} = -\frac{L}{3 \times k_{ibt}} \\ \frac{2 \times \xi}{\omega_n} = \frac{3 \times k_{pbt} - r_{cvs, bt} - r_L}{3 \times k_{ibt}} \end{cases} \quad (E.8)$$

Soit :

$$\begin{cases} k_{ibt} = -\frac{1}{3} L \cdot \omega_n^2 \\ k_{pbt} = -\frac{1}{3} (r_{cvs, bt} + r_L - 2 \times \xi \cdot L \cdot \omega_n) \end{cases} \quad (E.9)$$

Compte tenu des conventions adoptées, les gains du correcteur doivent impérativement être négatifs pour obtenir un système stable. Cela introduit la condition suivante sur le choix de la pulsation propre non amortie ;

$$\omega_n > \frac{r_{cvs, bt} + r_L}{2 \times \xi \cdot L} \quad (E.10)$$

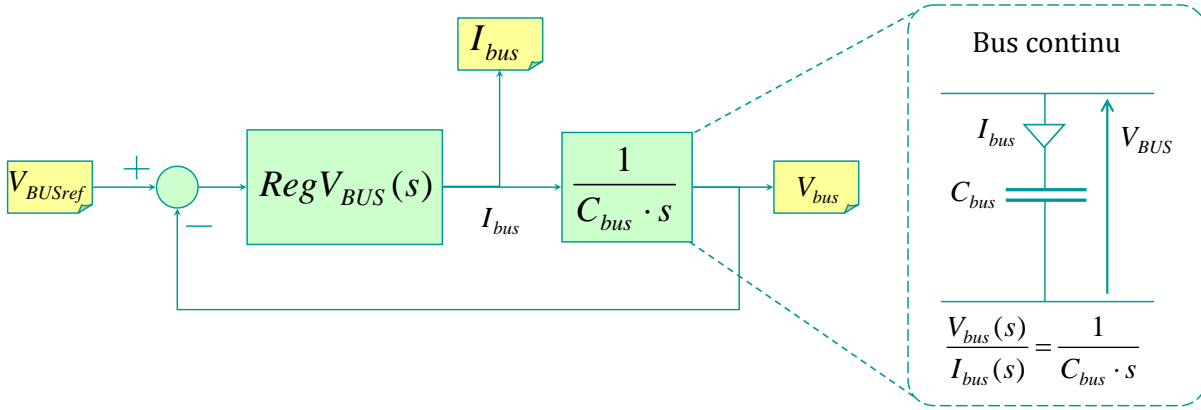


Fig. E.4: Modèle du bus et le régulateur de tension associé

L'application de la même démarche aux modules de supercondensateurs donne :

$$\begin{cases} k_{isc} = -\frac{1}{3}L \cdot \omega_n^2 \\ k_{psc} = -\frac{1}{3}(r_{cvs,sc} + r_L - 2 \times \xi \cdot L \cdot \omega_n) \\ \omega_n > \frac{r_{cvs,sc} + r_L}{2 \times \xi \cdot L} \end{cases} \quad (E.11)$$

E.2 Régulation de la tension du bus continu

Soit C_{bus} la capacité du bus, C_{bus} est la somme des capacités de filtrage des convertisseurs montés sur le bus. Chaque module de stockage admet une capacité de $3 \times 600 \mu F$, ce qui fait un total de 21.6 mF . A cette capacité, il faut ajouter les capacités des convertisseurs de traction ($2 \times 6 \times 600 \mu F$) et des auxiliaires ($2 \times 3 \times 600 \mu F$). Au total, la capacité du bus de tension s'élève à environ :

$$C_{bus}^{max} = 32.4 \text{ mF} \quad (E.12)$$

Par ailleurs, en prenant en compte la situation extrême où la locomotive perd la moitié du dispositif de stockage, soit un déficit de $36 \times 600 \mu F$, on a :

$$C_{bus}^{min} = 21.6 \text{ mF} \quad (E.13)$$

La capacité du bus est donc un paramètre variable, évoluant entre 21.6 mF et 32.4 mF . La figure E.4 montre le modèle du bus de tension et le régulateur associé. Le régulateur de tension est de type PI de la forme :

$$\text{RegV}_{BUS}(s) = k_{pbus} + \frac{k_{ibus}}{s} \quad (E.14)$$

Il vient la fonction transfert en boucle fermée :

$$\frac{V_{BUS}(s)}{V_{BUSref}(s)} = \frac{\left(k_{pbus} + \frac{k_{ibus}}{s}\right) \cdot \frac{1}{C_{bus} \cdot s}}{1 + \left(k_{pbus} + \frac{k_{ibus}}{s}\right) \cdot \frac{1}{C_{bus} \cdot s}} \quad (E.15)$$

Soit :

$$\frac{V_{BUS}(s)}{V_{BUSref}(s)} = \frac{1 + \frac{k_{pbus}}{k_{ibus}} \cdot s}{1 + \frac{k_{pbus}}{k_{ibus}} \cdot s + \frac{C_{bus}}{k_{ibus}} \cdot s^2} \quad (E.16)$$

Par identification du dénominateur avec la fonction type du second ordre, on obtient :

$$\begin{cases} \frac{1}{\omega_n^2} = \frac{C_{bus}}{k_{ibus}} \\ \frac{2 \times \xi}{\omega_n} = \frac{k_{pbus}}{k_{ibus}} \end{cases} \quad (E.17)$$

Soit :

$$\begin{cases} k_{ibus} = C_{bus} \cdot \omega_n^2 \\ k_{pbus} = 2 \times \xi \cdot C_{bus} \cdot \omega_n \end{cases} \quad (E.18)$$

Bibliographie

- [1] Commission des comptes et de l'économie de l'environnement. Mobilité, transport et environnement. Technical report, CCEE, décembre 2006. (Cited on page 1.)
- [2] Nicolas Hulot. Pacte écologique. Technical report, Observatoire de la fondation Nicolas Hulot, 2007. (Cited on page 1.)
- [3] D.A.J. Rand, R. Woods, and R.M. Dell. *Batteries for Electric Vehicles*. Research Studies Press LTD, 1998. (Cited on pages 5, 14, 69, and 123.)
- [4] G. Planté. *C.R. Académie des Sciences*, 1860. (Cited on page 5.)
- [5] W. JUNGNER. *Swedish Patent*, 10 :177, 1899. (Cited on page 5.)
- [6] T.A. EDISON. *British Patent*, 20 :960, 1900. (Cited on page 5.)
- [7] Direction de la stratégie. Trafics et consommations d'énergie des différentes catégories de trains sncf par mode de traction en 1999. Technical report, SNCF, 2001. (Cited on pages 6 and 17.)
- [8] ADEME. Note de cadrage sur le contenu CO_2 du kwh d'usage en France. Technical report, ADEME, 2005. (Cited on pages 6 and 17.)
- [9] F. W. Donnelly, R. L. Cousineau, and R. N. M. Horsley. Hybrid technology for the rail industry. *Rail Conference, 2004. Proceedings of the 2004 ASME/IEEE*, 2004. (Cited on pages 6, 7, 9, and 58.)
- [10] R. L. Cousineau. Development of a hybrid switcher locomotive the railpower green goat. *Instrumentation & Measurement Magazine, IEEE*, 2006. (Cited on pages 6, 7, 9, and 86.)
- [11] C.R. Akli, X. Roboam, B. Sareni, and A. Jeunesse. Energy management and sizing of a hybrid locomotive. *12th European Conference on Power Electronics and Applications*, 2007. (Cited on pages 6 and 49.)

- [12] W. Koczara, L. Grzesiak, and M. da Ponte. Novel hybrid load-adaptive variable-speed generating set. *Proceedings IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, ISIE'98. (Cited on pages 6 and 54.)
- [13] W. Koczara, L. Grzesiak, and M. da Ponte. Hhybrid load-adaptive variable-speed generating set : New system topology and control strategy. *Proceedings of International Conference on Power Generation*, Decembre 1998. (Cited on pages 6 and 54.)
- [14] W. Koczara, L. Grzesiak, and M. da Ponte. Hybrid generator apparatus. *South African Patent Application No. 97/11503*, Decembre 1997. (Cited on pages 6 and 54.)
- [15] L. Grzesiak, W. Koczara, P. Pospiech, and M. da Ponte. Power quality of the hy-gen autonomous load-adaptive adjustable-speed generating system. *Applied Power Electronics Conference and Exposition*, APEC '99. (Cited on pages 6 and 54.)
- [16] M. OSAWA. The ne@train, first hybrid material in the world. *Rail international*, Avril 2004. (Cited on pages 7 and 86.)
- [17] David Briginshaw. Hybrid traction system benefits environment : Japan's new energy train project uses a hybrid diesel-electric traction system to achieve major reductions in energy consumption, noxious emissions, and noise. *International Railway Journal*, Decembre 2004. (Cited on pages 7 and 86.)
- [18] M. Steiner, M. Klohr, and S. Pagiela. Energy storage system with ultracaps on board of railway vehicles. *Power Electronics and Applications*, EPE'07. (Cited on pages 12 and 16.)
- [19] L. Torcheux and C. Sarrazin. Essais d'accumulateurs ni-zn 1.6 v/30 ah de la société scps. Technical report, EDF R&D, octobre 2004. (Cited on page 15.)
- [20] J.Chabas and G.Coquery. Hybrid tram-train using ultra-capacitors for electric power supply. *PROSPER'2001, Karlsruhe*, 2001. (Cited on page 16.)
- [21] A.Jeunesse and M.Thiounn. A hybrid locomotive for demonstration and investigation on energetics. *WCRR06*, 2006. (Cited on page 16.)
- [22] S. Lemofouet and A. Rufer. A hybrid energy storage system based on compressed air and supercapacitors with maximum efficiency point tracking (mept). *Industrial Electronics, IEEE Transactions*, 2006. (Cited on pages 16 and 58.)
- [23] A. Rufer, D. Hotellier, and P. Barrade. A supercapacitor-based energy storage substation for voltage compensation in weak transportation networks. *Power Delivery, IEEE Transactions*, 2004. (Cited on page 16.)
- [24] A. Rufer, D. Hotellier, and P. Barrade. A supercapacitor-based energy storage substation for voltage compensation in weak transportation networks. *Power Delivery, IEEE Transactions*, 2004. (Cited on page 16.)

- [25] Direction de l'Innovation et de la Recherche. Plate-forme pour trains hybrides économiques en énergie et respectueux de l'environnement. Technical report, SNCF, 2006. (Cited on pages 17 and 21.)
- [26] B. Multon. *Composants Passifs de l'Electronique de Puissance*. ENS de Cachan, Antenne de Bretagne, 2006. (Cited on page 18.)
- [27] C.R. Akli, X. Roboam, B. Sareni, and A. Jeunesse. Etude et modélisation d'une locomotive hybride. *Electrotechnique du Future*, 2007. (Cited on pages 24 and 49.)
- [28] A. Jeunesse. Dynamique des trains en mouvement. Technical report, SNCF, 2005. (Cited on pages 27, 28, 29, and 30.)
- [29] A. JEUNESSE and M. ROLLIN. La motorisation du tgv pos. *Revue Générale des Chemins de Fer*, Mars 2004. (Cited on pages 28 and 30.)
- [30] C. LAURENCIN, C. RONDEAU, and M. DEBRUYNE. La bb427000 de la sncf : les choix techniques pour la traction et le freinage. *Revue Générale des Chemins de Fer*, Mars 2002. (Cited on pages 28 and 30.)
- [31] C. COURTOIS, F. LACÔTE, M. PROVOOST, and V. SABATE. Traction électrique ferroviaire. *Technique de l'Ingénieur*, 1999. (Cited on pages 28 and 30.)
- [32] S. Astier. De la modélisation à la commande et à la caractérisation des systèmes électromécaniques à propulsion asynchrone. *HDR, INP Toulouse*, 2000. (Cited on page 50.)
- [33] S. Astier. Des machines à aimants permanents aux systèmes énergétiques autonomes. systémique, électricité et développement durable. *HDR, INP Toulouse*, 2003. (Cited on page 50.)
- [34] H. Demni, H. Piquet, and H. Foch. Conception en électronique de puissance à l'aide d'éléments caractérisés. *JTEA'2002*, 2002. (Cited on page 50.)
- [35] J. Regnier. *Conception de systèmes hétérogènes en Génie Électrique par optimisation évolutionnaire multicritère*. PhD thesis, INP Toulouse, 2003. (Cited on pages 50, 193, and 201.)
- [36] W. Koczara, L. Grzesiak, and M. da Ponte. Generating power at any speed? *Progress - Engines and Drives*, July 1995. (Cited on page 54.)
- [37] J. Larminie and A. Dicks. *Fuel Cell System Explained*. John Wiley and Sons, 2000. (Cited on page 55.)
- [38] R. Saisset. *Contribution à l'étude systémique de dispositifs énergétiques à composants électrochimiques*. PhD thesis, INP Toulouse, 2004. (Cited on page 55.)
- [39] Martin W. Carlen Thomas Christen. Theory of ragone plots. *Journal of Power Sources*, 2000. (Cited on pages 58 and 60.)

- [40] Thomas Christen and Christian Ohler. Optimizing energy storage devices using ragone plots. *Journal of Power Sources*, 2002. (Cited on pages 58 and 60.)
- [41] O. Langlois. *Conception d'un réseau de secours électrique pour l'aéronautique*. PhD thesis, INP Toulouse, 2006. (Cited on pages 72, 162, 165, 167, 174, and 254.)
- [42] D.J. Spiers and A.D. Rasinkoski. Predicting the service lifetime of lead/acid batteries in photovoltaic systems. *Journal of Power Sources*, 1995. (Cited on page 123.)
- [43] D.J. Spiers and A.D. Rasinkoski. Limits to battery lifetime in photovoltaic applications. *Journal of Power Sources*, 1997. (Cited on page 123.)
- [44] S. Drouilhet and B.L Johnson. A battery life prediction method for hybrid power applications. *ASME Wind Energy Symposium Technical*, 1997. (Cited on page 123.)
- [45] A.J. Ruddella, A.G. Duttona, H. Wenzlb, C. Ropeterb, D.U. Sauerc, J. Mertend, C. Orfanogiannise, J.W. Twidellf, and P. Vezing. Analysis of battery current micro-cycles in autonomous renewable energy systems. *Journal of Power Sources*, 2002. (Cited on pages 123, 124, and 136.)
- [46] William Henson. Optimal battery/ultracapacitor storage combination. *ASME Wind Energy Symposium Technical*, 2008. (Cited on page 124.)
- [47] V. Pareto. *Cours d'économie politique*. Lauzanne Rouge, 1881. (Cited on pages 137 and 188.)
- [48] B. Sareni. *Conception simultanée par Optimisation des Systèmes D'énergie Electrique*. HDR INP Toulouse, 2006. (Cited on pages 137, 188, 189, and 201.)
- [49] R. Baussiere, F. Labrique, and G. Segulier. *Power Electronics Converters : DC-DC conversion*. Springer-Verlag, 1987. (Cited on pages 156, 157, and 158.)
- [50] Pu Shi and Yiwen Zhao. Application of unscented kalman filter in the soc estimation of li-ion battery for autonomous mobile robot. *International Conference on Information Acquisition*, 2006. (Cited on page 160.)
- [51] V. Coroban, I. Boldea, and F. Blaabjerg. A novel on-line state-of-charge estimation algorithm for valve regulated lead-acid batteries used in hybrid electric vehicles. *Electrical Machines and Power Electronics*, septembre 2007. (Cited on page 160.)
- [52] B. Sareni S. A. Randi, S. Astier. Full modelling approach of electric vehicle for design optimisation. *18th International Electric Vehicle Symposium*, 2001. (Cited on pages 188, 189, and 201.)

TITLE : Systemic design of an autonomous hybrid locomotive.

Application in the hybrid locomotive of demonstration and investigations in energetic, LHyDIE developed by the FNRC (French National Railway Company)

ABSTRACT

In the framework of the PLATHEE (PLATe-forme pour Trains Hybrides Economies en Energie et respectueux de l'environnement) project, SNCF and LAPLACE laboratory are together involved with other partners in the design, the energy management and the sizing of a hybrid locomotive so-called LHYDIE (Locomotive Hybride de Démonstration et d'Investigation en Energétique). This hybrid locomotive integrates a diesel generator coupled with Ni-Cd accumulators and supercapacitors.

Based on a "sequential design approach", starting from a pre-defined architecture, the first step deals with the synthesis of the energy management strategy followed by the system sizing. During this first study step, the necessity of "using the right model for the right goal" is put forward: models and design steps are set in accordance. Several granularity levels of modeling are then proposed following the design stage. From these models, architecture, energy management and sizing of the LHYDIE locomotive are defined and validated.

A second step of this study consists in a revision of the design process following a "simultaneous design approach" based on a systemic modeling coupled with a multi criteria optimization tool. This tool allows simultaneously choosing parameters dealing with sizing, management and even system architecture issues. Main targeted criteria are fuel burn, polluted emissions, life cycle (in particular for storage devices) and system cost. Design choices in terms of sizing and energy management are directly exploited and adapted on the LHYDIE locomotive prototype actually built in SNCF facilities.

AUTEUR : Cossi Rockys AKLI

TITRE : Conception systémique d'une locomotive hybride autonome.

Application à la locomotive hybride de démonstration
et d'investigations en énergétique LHyDIE
développée par la SNCF

DIRECTEURS DE THESE : Xavier ROBOAM, Bruno SARENI

LIEU ET DATE DE SOUTENANCE : 27 juin 2008 à l'ENSEEIH

RESUME en français

Dans le cadre du projet PLATHEE la SNCF et le laboratoire LAPLACE s'intéressent à la conception, au dimensionnement et à la gestion d'énergie d'une locomotive hybride autonome baptisée LHYDIE. La locomotive hybride est constituée d'un groupe diesel couplé à des accumulateurs Ni-Cd et des supercondensateurs. Une première phase d'étude selon une approche de « conception séquentielle » a permis, à partir d'une architecture pré définie, de synthétiser une stratégie de gestion d'énergie puis de dimensionner les éléments de la locomotive. Une seconde phase d'étude a consisté à reprendre le problème selon une démarche de « conception simultanée », basée sur un modèle systémique dimensionnel couplé à un outil d'optimisation multicritère. Cet outil permet d'effectuer simultanément différents choix paramétriques inhérents aux dimensions, mais aussi à la stratégie de gestion voire à l'architecture système. Les principaux critères visés sont la consommation et pollution, la durée de vie des composants (de stockage en particulier) et le coût système. Les dimensions et choix en termes de stratégie de gestion issus de cette thèse sont directement exploités sur la locomotive LHYDIE, actuellement en cours de construction.

Systémique – Véhicule hybride – Hybridation ferroviaire – Gestion énergétique – Stockage – Gestion énergétique fréquentielle – Locomotive hybride – Batterie – Supercondensateurs – Groupe Diesel – Modélisation – Optimisation multicritère – Mission.

GENIE ELECTRIQUE

Laboratoire PLASmas et Conversion d'Energie (LAPLACE)
UMR CNRS-INPT-UPS n°5213
2 rue Charles Camichel 31071, BP 7122 Toulouse Cedex 7
akli@laplace.univ-tlse.fr